Классический курс

11

ФИЗИКА



ПРОСВЕЩЕНИЕ
ИЗДАТЕЛЬСТВО

Классический курс

Г. Я. Мякишев   Б. Б. Буховцев   В. М. Чаругин

ФИЗИКА

11 класс

Учебник для общеобразовательных организаций

с приложением на электронном носителе

Базовый и профильный уровни

Под редакцией проф. Н. А. Парфентьевой

Рекомендовано
Министерством образования и науки
Российской Федерации

23-е издание

Москва
«Просвещение»
2014

УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я72
М99

Серия «Классический курс» основана в 2007 году

Разделы «Основы электродинамики», «Колебания и волны», «Оптика» и «Квантовая физика» написаны **Б. Б. Буховцевым** и **Г. Я. Мякишевым.**

Раздел «Астрономия» написан **В. М. Чаругиным.**

На учебник получены положительные заключения Российской академии наук (№ 10106-5215/15 от 31.10.2007) и Российской академии образования (№ 01-215/5/7д от 11.10.2007)

Обратите внимание!

Параграфы, номера которых напечатаны на цветном фоне, — для обязательного изучения.

Параграфы, номера которых приведены в цветной рамке, — для дополнительного чтения.

Мякишев Г. Я.
М99 Физика. 11 класс : учеб. для общеобразоват. организаций с прил. на электрон. носителе : базовый и профил. уровни / Г. Я. Мякишев, Б. Б. Буховцев, В. М. Чаругин; под ред. Н. А. Парфентьевой. — 23-е изд. — М. : Просвещение, 2014. — 399 с., [4] л. ил. — (Классический курс). — ISBN 978-5-09-032373-4.

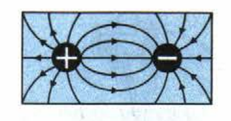
Материал учебника, завершающего предметную линию «Классический курс», дает представление о современной физике: теории относительности, квантовой теории, физике атомного ядра и элементарных частиц, строении Вселенной.

Учебник соответствует федеральному компоненту Государственного образовательного стандарта и реализует базовый и профильный уровни образования учащихся 11 классов.

УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я72

ISBN 978-5-09-032373-4

© Издательство «Просвещение», 1991, 2008
© Художественное оформление. Издательство «Просвещение», 2008
Все права защищены



ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ (Продолжение)

Продолжим изучение электродинамики. Ознакомимся с магнитными полями, не изменяющимися с течением времени, и магнитными и электрическими полями, изменяющимися со временем. С электрическими полями, не изменяющимися с течением времени, вы ознакомились в 10 классе.

Глава 1. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Неподвижные электрические заряды создают вокруг себя электрическое поле. Движущиеся заряды создают, кроме того, магнитное поле.

§ 1 ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТОКОВ

Между неподвижными электрическими зарядами действуют силы, определяемые законом Кулона. Согласно теории близкодействия это взаимодействие осуществляется так: каждый из зарядов создает электрическое поле, которое действует на другой заряд.

Однако между электрическими зарядами могут существовать силы и иной природы. Их можно обнаружить с помощью следующего опыта.

Возьмем два гибких проводника, укрепим их вертикально, а затем присоединим нижними концами к полюсам источника тока (рис. 1.1). Притяжения или отталкивания проводников при этом не обнаружится[1].

Если теперь другие концы проводников замкнуть проволокой так, чтобы в проводниках возникли токи *противоположного направления*, то проводники начнут отталкиваться друг от друга (рис. 1.2). В случае же токов *одного направления* проводники притягиваются (рис. 1.3).

Взаимодействия между проводниками с током, т. е. взаимодействия между направленно движущимися электрическими зарядами, называют *магнитными*. Силы, с ко-

[1] Проводники заряжаются от источника тока, но заряды проводников при разности потенциалов между ними в несколько вольт ничтожно малы. Поэтому кулоновские силы никак не проявляются.

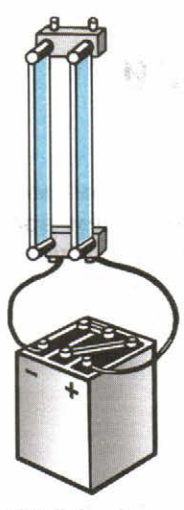


Рис. 1.1

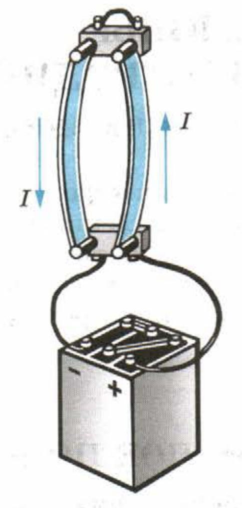


Рис. 1.2

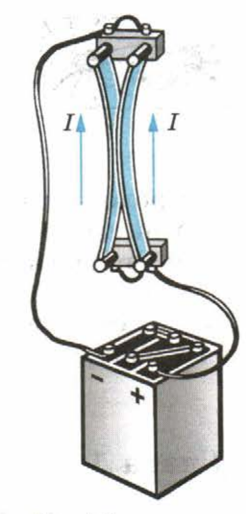


Рис. 1.3

торыми проводники с током действуют друг на друга, называют *магнитными силами*.

Магнитное поле. Согласно теории близкодействия, подобно тому как в пространстве, окружающем неподвижные электрические заряды, возникает электрическое поле, в пространстве, окружающем токи, возникает поле, называемое **магнитным.**

Электрический ток в проводнике создает вокруг себя магнитное поле, которое действует на ток в другом проводнике. А поле, созданное электрическим током второго проводника, действует на первый.

Магнитное поле представляет собой особую форму материи, посредством которой осуществляется взаимодействие между движущимися электрически заряженными частицами.

Перечислим основные свойства магнитного поля, которые установлены экспериментально.

1. Магнитное поле порождается электрическим током (направленно движущимися зарядами).

2. Магнитное поле обнаруживается по действию на электрический ток (на движущиеся заряды).

Подобно электрическому полю, магнитное поле существует реально, независимо от нас, от наших знаний о нем.

Экспериментальным доказательством реальности магнитного поля, как и реальности электрического поля, может служить факт существования электромагнитных волн.

Замкнутый контур с током в магнитном поле. Для изучения магнитного поля можно взять замкнутый контур малых (по сравнению с расстояниями, на которых магнитное поле заметно изменяется) размеров. Например, можно взять маленькую плоскую проволочную рамку произвольной формы (рис. 1.4). Подводящие ток проводники нужно расположить близко друг к другу (рис. 1.4, *а*) или сплести их вместе (рис. 1.4, *б*). Тогда результирующая сила, действующая со стороны магнитного поля на эти проводники, будет равна нулю.

Выяснить характер действия магнитного поля на контур с током можно с помощью следующего опыта.

Подвесим на тонких гибких проводниках, сплетенных вместе, маленькую плоскую рамку, состоящую из нескольких витков проволоки. На расстоянии, значительно большем размеров рамки, вертикально расположим провод (рис. 1.5, *а*). Рамка при пропускании электрического тока через нее и через провод поворачивается и располагается так, что провод оказывается в плоскости рамки (рис. 1.5, *б*). При изменении направления тока в проводе рамка поворачивается на 180°.

Опыт показывает, что магнитное поле создается не только токами в проводниках. Любое направленное движение электрических зарядов вызывает появление магнитного поля. Так, например, токи в газах, полупроводниках вызывают возникновение в окружающем их пространстве магнитного поля. Смещение связанных электрических зарядов в диэлектрике, помещенном в переменное электрическое поле, также вызывает появление магнитного поля.

Из курса физики вам известно, что магнитное поле создается не только электрическим током, но и постоянными магнитами. Если мы подвесим на гибких проводах плоскую рамку с током между полюсами магнита, то рамка будет пово-

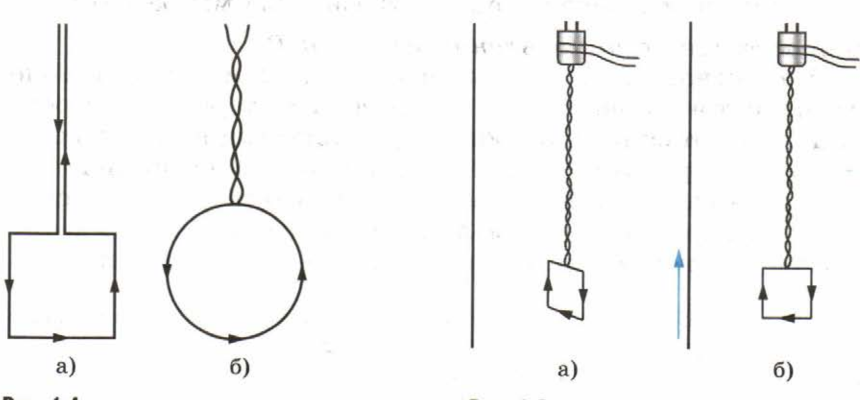


Рис. 1.4

Рис. 1.5

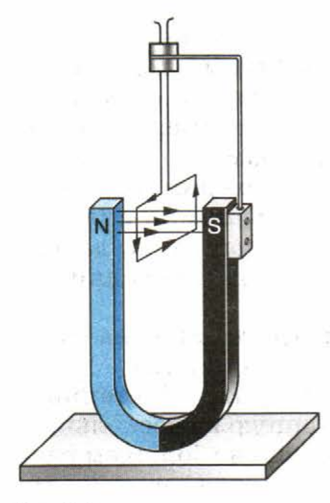


Рис. 1.6

рачиваться до тех пор, пока ее плоскость не установится перпендикулярно линии, соединяющей полюсы магнита (рис. 1.6). Таким образом, магнитное поле оказывает на рамку с током *ориентирующее действие*[1].

Движущиеся заряды (электрический ток) создают магнитное поле.

Вокруг любых направленно движущихся зарядов возникает магнитное поле. Оно также появляется в случае, если в пространстве существует электрическое поле, изменяющееся со временем.

Обнаруживается магнитное поле по действию на электрический ток.



1. Какие взаимодействия называют магнитными?

2. Перечислите основные свойства магнитного поля.

§ 2 ВЕКТОР МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ. ЛИНИИ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Электрическое поле характеризуется векторной величиной — напряженностью электрического поля. Надо бы ввести также и величину, характеризующую магнитное поле количественно. Дело это непростое, так как магнитные взаимодействия сложнее электрических. Векторную характеристику магнитного поля называют вектором магнитной индукции и обозначают буквой $\vec{B}$. Сначала мы рассмотрим вопрос только о *направлении вектора* $\vec{B}$.

Магнитная стрелка. Мы видели, что в магнитном поле рамка с током на гибком подвесе, со стороны которого не действуют силы упругости, препятствующие ориентации рамки, поворачивается до тех пор, пока она не установится определенным образом. Вам известно, что так же ведет себя и магнитная стрелка — маленький продолговатый магнит с двумя полюсами на концах — южным S и северным N.

[1] Однородное магнитное поле оказывает на рамку, как показывает опыт, лишь ориентирующее действие. В неоднородном магнитном поле рамка, кроме того, будет двигаться поступательно, притягиваясь к проводнику с током или отталкиваясь от него.

Направление вектора магнитной индукции. Ориентирующее действие магнитного поля на магнитную стрелку или рамку с током можно использовать для определения направления вектора магнитной индукции.

За направление вектора магнитной индукции принимается направление, которое показывает северный полюс N магнитной стрелки, свободно устанавливающейся в магнитном поле (рис. 1.7, *а*). Это направление совпадает с направлением положительной нормали к замкнутому контуру с током (рис. 1.7, *б*). *Положительная нормаль* направлена в ту сторону, куда перемещается буравчик (с правой нарезкой), если вращать его по направлению тока в рамке (рис. 1.7, *в*).

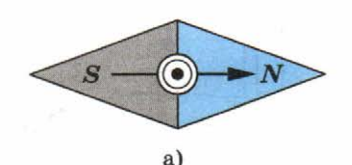
Используя рамку с током или магнитную стрелку, можно определить направление вектора магнитной индукции в любой точке поля.

На рисунках 1.8, 1.9 показаны опыты с магнитной стрелкой, повторяющие опыты с рамкой (см. рис. 1.5, 1.6).

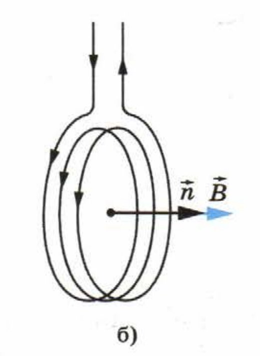
В магнитном поле прямолинейного проводника с током магнитная стрелка в каждой точке устанавливается по касательной к окружности (см. рис. 1.9). Плоскость такой окружности перпендикулярна проводу, а центр ее лежит на оси провода.

Направление вектора магнитной индукции устанавливают с помощью *правила буравчика: если направление поступательного движения буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то направление вращения ручки буравчика указывает направление вектора магнитной индукции.*

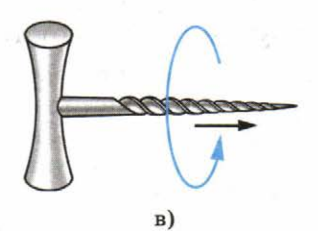
Опыт по определению направления вектора индукции магнитного



а)



б)



в)

Рис. 1.7

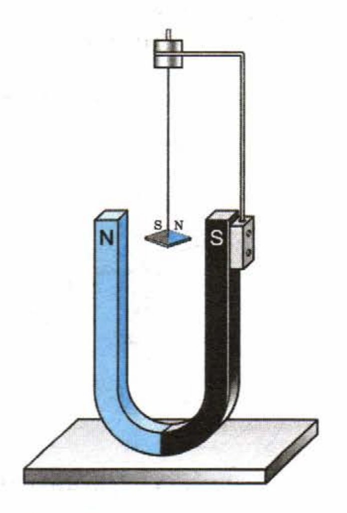
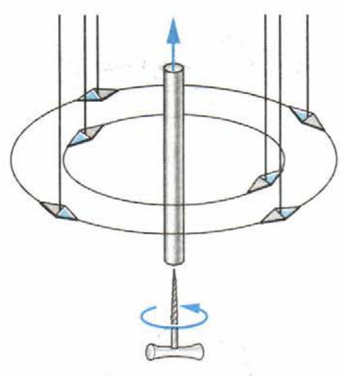


Рис. 1.8



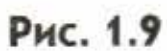


Рис. 1.9

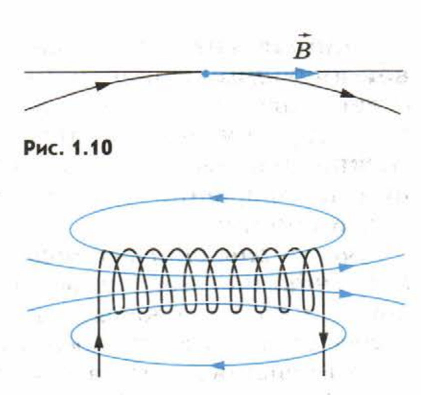


Рис. 1.10

Рис. 1.11

поля Земли проводит каждый, кто ориентируется на местности по компасу.

Линии магнитной индукции. Наглядную картину магнитного поля можно получить, если построить так называемые линии магнитной индукции. **Линиями магнитной индукции** называют линии, касательные к которым в любой их точке совпадают с вектором $\vec{B}$ в данной точке поля (рис. 1.10). Линии вектора магнитной индукции аналогичны линиям вектора напряженности электростатического поля.

Для магнитного поля прямолинейного проводника с током из приведенных ранее опытов следует, что линии магнитной индукции — концентрические окружности, лежащие в плоскости, перпендикулярной этому проводнику с током (см. рис. 1.9). Центр окружностей находится на оси проводника. Стрелки на линиях указывают, в какую сторону направлен вектор магнитной индукции, касательный к данной линии.

Магнитное поле Земли

Земной шар

N

S

N

S

Ось вращения

Магнитная ось

Рис. 1.12

На рисунке 1.11 показана картина магнитного поля катушки с током (соленоида). Если длина соленоида много больше его диаметра, то магнитное поле внутри соленоида можно считать *однородным.* Линии магнитной индукции такого поля *параллельны* и находятся на равных расстояниях друг от друга.

На рисунке 1.12 показано магнитное поле Земли. Линии магнитной индукции поля Земли подобны линиям магнит-

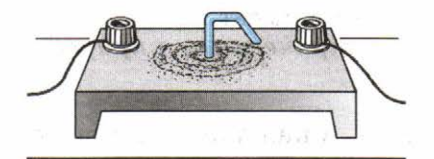


Рис. 1.13

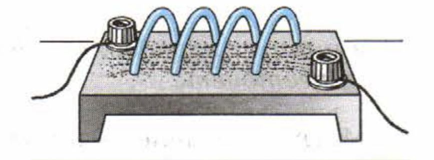


Рис. 1.14

ной индукции поля соленоида. Магнитный северный полюс N близок к Южному географическому полюсу, а магнитный южный полюс S — к Северному географическому полюсу. Ось такого большого магнита составляет с осью вращения Земли угол $11{,}5°$. Периодически магнитные полюсы меняют свою полярность. Последняя такая замена произошла около 30 000 лет назад.

Картину линий магнитной индукции можно сделать видимой, воспользовавшись мелкими железными опилками. С этим методом вы уже знакомы.

В магнитном поле каждый кусочек железа, насыпанный на лист картона, намагничивается и ведет себя как маленькая магнитная стрелка. Большое количество таких стрелок позволяет в большем числе точек определить направление магнитного поля и, следовательно, точнее выяснить расположение линий магнитной индукции. Примеры картин магнитного поля приведены на рисунках 1.13—1.16.

Вихревое поле. Важная особенность линий магнитной индукции состоит в том, что они не имеют ни начала, ни конца. Они всегда замкнуты. Вспомним, что с электростатическим полем дело обстоит иначе. Его силовые линии во всех случаях имеют источники: они начинаются на положительных зарядах и оканчиваются на отрицательных.

Поля с замкнутыми векторными линиями называют **вихревыми**. *Магнитное поле — вихревое поле.*

Замкнутость линий магнитной индукции представляет собой фундаментальное свойство магнитного поля. Оно за-

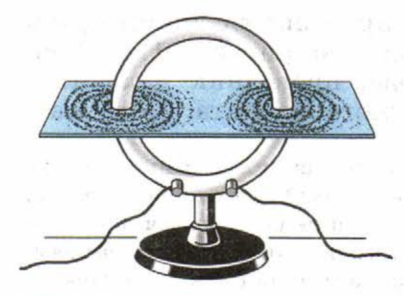


Рис. 1.15

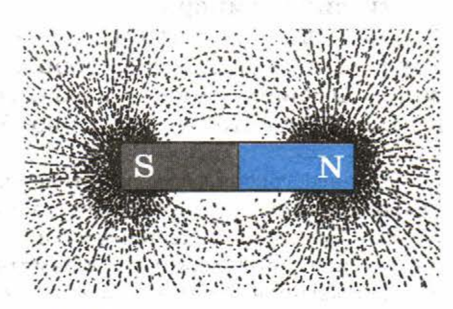


Рис. 1.16

ключается в том, что магнитное поле не имеет источников. *Магнитных зарядов, подобных электрическим, в природе не существует.*

Магнитное поле — вихревое поле, в каждой точке поля вектор магнитной индукции имеет определенное направление. Это направление указывает магнитная стрелка или его можно определить по правилу буравчика. Магнитное поле не имеет источников; магнитных зарядов в природе не существует.



1. **Как ориентируются в однородном магнитном поле замкнутый контур с током и магнитная стрелка?**
2. **Что называют линиями магнитной индукции?**
3. **Какие поля называют вихревыми?**
4. **Чем вихревое поле отличается от потенциального?**

§ 3 МОДУЛЬ ВЕКТОРА МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ. СИЛА АМПЕРА

Магнитное поле действует на все участки проводника с током. Зная силу, действующую на каждый малый участок проводника, можно вычислить силу, действующую на весь замкнутый проводник в целом.

Закон, определяющий силу, действующую на отдельный небольшой участок проводника (элемент тока), был установлен в 1820 г. А. Ампером[1]. Так как создать обособленный элемент тока нельзя, то Ампер проводил опыты с замкнутыми проводниками. Меняя форму проводников и их расположение, он сумел установить выражение для силы, действующей на отдельный элемент тока.

Модуль вектора магнитной индукции. Выясним экспериментально, от чего зависит сила, действующая на проводник с током в магнитном поле. Это позволит нам дать определение модуля вектора магнитной индукции, а затем найти силу Ампера.

Действие магнитного поля на проводник с током будем изучать на установке, изображенной на рисунке 1.17. Свободно подвешенный горизонтально проводник находится в поле постоянного подковообразного магнита. Поле маг-

[1] Точнее говоря, Ампер установил закон для силы взаимодействия между двумя небольшими участками (элементами) проводников с током. Он был сторонником теории дальнодействия и не пользовался понятием поля. Однако по традиции и в память о заслугах этого ученого выражение для магнитной силы, действующей на проводник с током со стороны магнитного поля, также называют законом Ампера.

Ампер Андре Мари (1775—1836) — великий французский физик и математик, один из основоположников электродинамики. Ввел в физику понятие «электрический ток» и разработал первую теорию магнетизма, основанную на гипотезе молекулярных токов, открыл механическое взаимодействие электрических токов и установил количественные соотношения для силы этого взаимодействия. Назван Максвеллом «Ньютон электричества». Работал также в области механики, теории вероятностей и математического анализа.



нита сосредоточено в основном между его полюсами, поэтому магнитная сила действует практически только на часть проводника длиной Δl, расположенную непосредственно между полюсами. Сила $\vec{F}$ измеряется с помощью специальных весов, которые соединяют с проводником двумя стерженьками. Она направлена горизонтально, перпендикулярно проводнику и линиям магнитной индукции.

Увеличивая силу тока в 2 раза, можно заметить, что и действующая на проводник сила также увеличивается в 2 раза. Добавив еще один такой же магнит, мы в 2 раза увеличим размеры области, где существует магнитное поле, и тем самым в 2 раза увеличим длину части проводника, на которую действует магнитное поле. Сила при этом также увеличится в 2 раза. И наконец, сила Ампера зависит от угла, образованного вектором $\vec{B}$ с проводником.

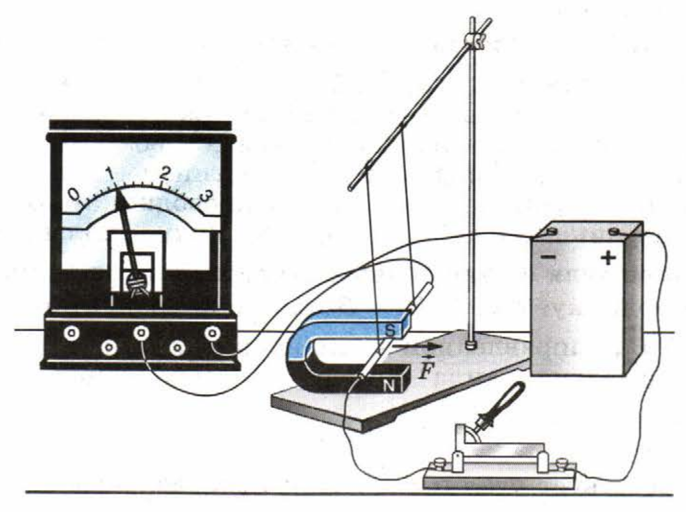


Рис. 1.17

В этом можно убедиться, меняя наклон подставки, на которой находятся магниты, так, чтобы изменялся угол между проводником и линиями магнитной индукции. Сила достигает максимального значения $\vec{F}_m$, когда вектор магнитной индукции перпендикулярен проводнику.

Итак, максимальная сила, действующая на отрезок проводника длиной Δl, по которому идет ток, прямо пропорциональна произведению силы тока I на длину участка Δl: $F_m \sim I \cdot \Delta l$.

Этот опытный факт можно использовать для определения модуля вектора магнитной индукции. В самом деле, поскольку $F_m \sim I\Delta l$, то отношение $\frac{F_m}{I\Delta l}$ не будет зависеть ни от силы тока в проводнике, ни от длины участка проводника. Именно поэтому это отношение можно принять за характеристику магнитного поля в том месте, где расположен участок проводника длиной Δl.

Модуль вектора магнитной индукции определяется отношением максимальной силы, действующей со стороны магнитного поля на отрезок проводника с током, к произведению силы тока на длину этого отрезка:

$$B = \frac{F_m}{I\Delta l}. \tag{1.1}$$

Магнитное поле полностью характеризуется вектором магнитной индукции $\vec{B}$. В каждой точке магнитного поля можно определить направление вектора магнитной индукции и его модуль, если измерить силу, действующую на отрезок проводника с током.

Модуль силы Ампера. Пусть вектор магнитной индукции $\vec{B}$ составляет угол α (рис. 1.18) с направлением отрезка проводника с током (элементом тока). (За направление элемента тока принимают направление, в котором по проводнику идет ток.) Опыт показывает, что магнитное поле, вектор индукции которого направлен вдоль проводника с током, не оказывает никакого действия на ток. Модуль силы зависит лишь от модуля составляющей вектора $\vec{B}$, перпендикулярной проводнику, т. е. от $B_\perp = B \sin\alpha$, и не зависит от составляющей $\vec{B}_\parallel$, направленной вдоль проводника.

Максимальная сила **Ампера** согласно формуле (1.1) равна:

$$F_m = I\,\Delta l\,B,$$

ей соответствует угол $\alpha = \frac{\pi}{2}$. При произвольном значении угла α сила пропорциональна не B, а составляющей

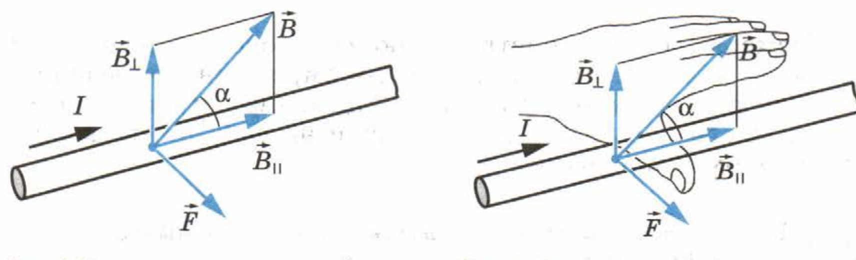


Рис. 1.18 **Рис. 1.19**

$B_\perp = B \sin \alpha$. Поэтому выражение для силы F, действующей на малый отрезок проводника Δl, при силе тока в нем I, со стороны магнитного поля с индукцией $\vec{B}$, составляющей с элементом тока угол α, имеет вид

$$F = I|\vec{B}|\Delta l \sin \alpha. \quad (1.2)$$

Это выражение называют ***законом Ампера. Модуль силы Ампера равен произведению силы тока, модуля вектора магнитной индукции, длины отрезка проводника и синуса угла между направлениями вектора магнитной индукции и элемента тока.***

Направление силы Ампера. В рассмотренном выше опыте вектор $\vec{F}$ перпендикулярен элементу тока и вектору $\vec{B}$. Его направление определяется *правилом левой руки*: если левую руку расположить так, чтобы перпендикулярная проводнику составляющая вектора магнитной индукции $\vec{B}$ входила в ладонь, а четыре вытянутых пальца были направлены по направлению тока, то отогнутый на 90° большой палец укажет направление силы, действующей на отрезок проводника (рис. 1.19).

Это правило справедливо во всех случаях.

Единица магнитной индукции. Мы ввели новую величину — вектор магнитной индукции. *За единицу модуля вектора магнитной индукции можно принять магнитную индукцию однородного поля, в котором на отрезок проводника длиной* 1 м *при силе тока в нем* 1 А *действует со стороны поля максимальная сила* $F_m = 1$ Н. Согласно формуле (1.1) единица магнитной индукции равна $1\,\frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}$.

Единица магнитной индукции получила название *тесла* (Тл) в честь сербского ученого-электротехника Н. Тесла (1856—1943).

Измеряя силу, действующую со стороны магнитного поля на участок проводника с током, можно определить модуль вектора магнитной индукции. Сформулирован закон Ампера для силы, действующей на участок проводника с током в магнитном поле.



1. Как определяется модуль вектора магнитной индукции?
2. Чему равен модуль вектора силы Ампера?
3. Сформулируйте правило для определения направления силы Ампера.
4. В каких единицах выражается магнитная индукция?

§ 4 ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Ориентирующее действие магнитного поля на контур с током (см. § 2) используют в электроизмерительных приборах магнитоэлектрической системы — амперметрах и вольтметрах.

Измерительный прибор магнитоэлектрической системы устроен следующим образом (рис. 1.20). На легкую алюминиевую рамку *2* прямоугольной формы с прикрепленной к ней стрелкой *4* намотана катушка. Рамка укреплена на двух полуосях OO'. В положении равновесия ее удерживают две тонкие спиральные пружины *3*. Силы упругости со стороны пружин, возвращающие катушку в положение равновесия, пропорциональны углу отклонения стрелки от положения равновесия. Катушку помещают между полюсами постоянного магнита M с наконечиками специальной формы. Внутри катушки расположен цилиндр *1* из железа. Такая конструкция обеспечивает радиальное направление линий магнитной индукции в той области, где находятся витки катушки (рис. 1.21). В результате при любом положении катушки силы, действующие на нее со стороны магнитного поля, максимальны и при неизменной силе тока постоянны. Векторы $\vec{F}$ и $-\vec{F}$ изображают силы, действующие на катушку со стороны магнитного поля и поворачивающие ее. Катушка с током поворачивается до тех пор, пока силы упругости со

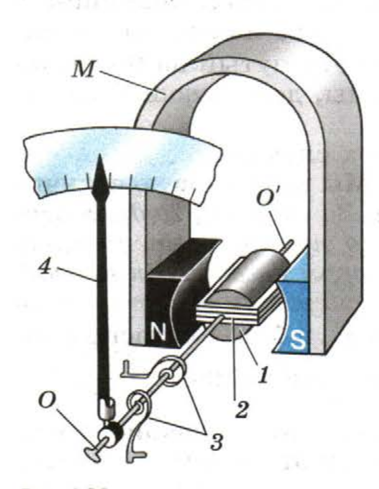


Рис. 1.20

стороны пружин не уравновесят силы, действующие на рамку со стороны магнитного поля. Увеличивая силу тока в 2 раза, мы обнаружим, что стрелка поворачивается на угол, вдвое больший, и т. д. Это происходит потому, что силы, действующие на катушку со стороны магнитного поля, прямо пропорциональны силе тока: $F_m \sim I$. Благодаря этому можно определить силу тока по углу поворота катушки, если проградуировать прибор. Для этого надо установить, каким углам поворота стрелки соответствуют известные значения силы тока.

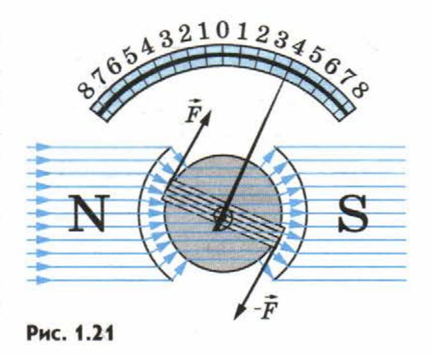


Рис. 1.21

Такой же прибор может измерять и напряжение. Для этого нужно градуировать прибор так, чтобы угол поворота стрелки соответствовал определенным значениям напряжения. Кроме того, сопротивление вольтметра должно быть много больше сопротивления амперметра.

В основе устройства электроизмерительных приборов магнитоэлектрической системы лежит действие магнитного поля на рамку с током.



1. **Почему магнитные силы, действующие на проводники катушки прибора, не зависят от угла поворота катушки?**
2. **Что удерживает рамку от вращения в магнитном поле?**
3. **Чем амперметр отличается от вольтметра?**

§ 5 ПРИМЕНЕНИЕ ЗАКОНА АМПЕРА. ГРОМКОГОВОРИТЕЛЬ

Зная направление и модуль силы, действующей на любой участок проводника с током, можно вычислить суммарную силу, действующую на весь замкнутый проводник. Для этого надо найти сумму сил, действующих на каждый участок проводника с током.

Закон Ампера используют для расчета сил, действующих на проводники с током, во многих технических устройствах. В частности — в электродвигателях, с которыми вы ознакомились в предыдущих классах.

Разберем устройство громкоговорителя.

Громкоговоритель служит для возбуждения звуковых волн под действием переменного электрического тока, ме-

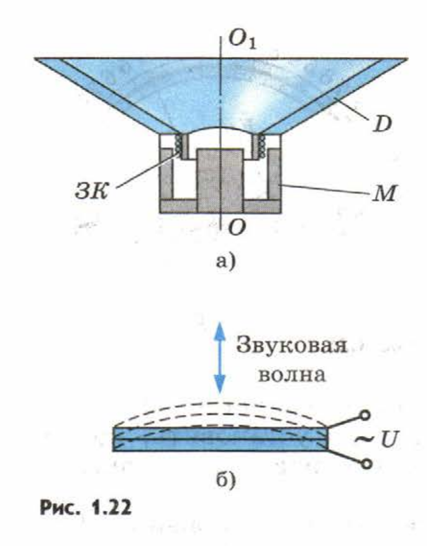


Рис. 1.22

няющегося со звуковой частотой. В электродинамическом громкоговорителе (динамике) используется действие магнитного поля постоянного магнита на переменный ток в подвижной катушке.

Схема устройства громкоговорителя показана на рисунке 1.22, *а*. Звуковая катушка *ЗК* располагается в зазоре кольцевого магнита *М*. С катушкой жестко связан бумажный конус — диафрагма *D*. Диафрагма укреплена на упругих подвесах, позволяющих ей совершать вынужденные колебания вместе с подвижной катушкой.

По катушке проходит переменный электрический ток с частотой, равной звуковой частоте сигнала с микрофона или с выхода радиоприемника, проигрывателя, магнитофона. Под действием силы Ампера катушка колеблется вдоль оси громкоговорителя OO_1 (см. рис. 1.22, *а*) в такт с колебаниями тока. Эти колебания передаются диафрагме, и поверхность диафрагмы излучает звуковые волны.

Первоклассные громкоговорители воспроизводят без значительных искажений звуковые колебания в диапазоне 40—15 000 Гц. Но такие устройства очень сложны. Поэтому обычно применяют системы из нескольких громкоговорителей, каждый из которых воспроизводит звук в определенном небольшом интервале частот. Общим недостатком всех громкоговорителей является их малый КПД. Они излучают лишь 1—3% подводимой энергии.

Звук в радиоприемнике, проигрывателе и магнитофоне возникает в результате движения катушки с током в поле постоянного магнита.

Наряду с электромеханическими громкоговорителями в настоящее время широкое применение получили громкоговорители, основанные на пьезоэлектрическом эффекте. Этот эффект проявляется в виде деформации некоторых типов кристаллов в электростатическом поле. Две пьезопластинки склеивают. Пластинки подбирают так, что одна из них увеличивается по длине под действием поля, а другая уменьшается (см. рис. 1.22, *б*). В результате получают элемент, который сильно изгибается под действием поля и при переменном электрическом поле создает акустическую волну. Пьезогромкоговорители очень удобны в изго-

товлении и могут быть совсем маленькими. Вследствие этого они нашли широкое применение в радиотелефонах, мобильных телефонах, ноутбуках и микрокомпьютерах.

Взаимодействие токов и пьезоэлектрический эффект положены в основу принципа работы современных громкоговорителей.



Укажите направление вектора магнитной индукции, электрического тока и силы Ампера на схеме громкоговорителя (см. рис. 1.22).

§ 6 ДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ДВИЖУЩИЙСЯ ЗАРЯД. СИЛА ЛОРЕНЦА

Электрический ток — это упорядоченно движущиеся заряженные частицы. Поэтому действие магнитного поля на проводник с током есть результат действия поля на движущиеся заряженные частицы внутри проводника. Найдем силу, действующую на одну частицу.

Силу, действующую на движущуюся заряженную частицу со стороны магнитного поля, называют **силой Лоренца** в честь великого голландского физика Х. Лоренца (1853—1928) — основателя электронной теории строения вещества. Силу Лоренца можно найти с помощью закона Ампера.

Модуль силы Лоренца равен отношению модуля силы F, действующей на участок проводника длиной Δl, к числу N заряженных частиц, упорядоченно движущихся в этом участке проводника:

$$F_{\text{л}} = \frac{F}{N}. \qquad (1.3)$$

Рассмотрим отрезок тонкого прямого проводника с током (рис. 1.23). Пусть длина отрезка Δl и площадь поперечного сечения проводника S настолько малы, что вектор индукции магнитного поля $\vec{B}$ можно считать одинаковым в пределах этого отрезка проводника. Сила тока I в проводнике связана с зарядом частиц q, концентрацией заряженных частиц (числом зарядов в единице объема) и скоростью их упорядоченного движения v следующей формулой:

$$I = qnvS. \qquad (1.4)$$

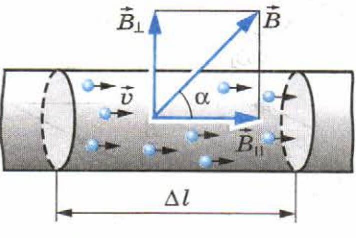


Рис. 1.23

Модуль силы, действующей со стороны магнитного поля на выбранный элемент тока, равен:

$$F = |I| B\Delta l \sin\alpha.$$

Подставляя в эту формулу выражение (1.4) для силы тока, получаем:

$$F = |q| nvS\Delta lB \sin\alpha = v|q| NB \sin\alpha,$$

где $N = nS\Delta l$ — число заряженных частиц в рассматриваемом объеме. Следовательно, на каждый движущийся заряд со стороны магнитного поля действует сила Лоренца, равная:

$$\boxed{F_{Л} = \frac{F}{N} = |q| vB \sin\alpha,} \qquad (1.5)$$

где α — угол между вектором скорости и вектором магнитной индукции. Сила Лоренца перпендикулярна векторам $\vec{B}$ и $\vec{v}$. Ее направление определяется с помощью того же *правила левой руки*, что и направление силы Ампера: если левую руку расположить так, чтобы составляющая магнитной индукции $\vec{B}$, перпендикулярная скорости заряда, входила в ладонь, а четыре вытянутых пальца были направлены по движению положительного заряда (против движения отрицательного), то отогнутый на 90° большой палец укажет направление действующей на заряд силы Лоренца $F_{Л}$ (рис. 1.24).

Электрическое поле действует на заряд q с силой $\vec{F}_{эл} = q\vec{E}$. Следовательно, если есть и электрическое поле, и магнитное поле, то суммарная сила $\vec{F}$, действующая на заряд, равна:

$$\vec{F} = \vec{F}_{эл} + \vec{F}_{Л}.$$

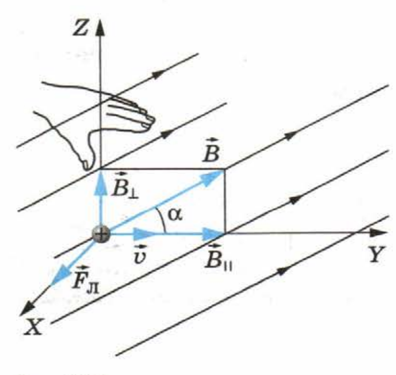


Рис. 1.24

Так как сила Лоренца перпендикулярна скорости частицы, то она *не совершает работы*. Согласно теореме о кинетической энергии (см. учебник физики для 10 класса) это означает, что сила Лоренца *не меняет кинетическую энергию частицы* и, следовательно, модуль ее скорости. Под действием силы Лоренца меняется лишь направление скорости частицы.

Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле. Рассмотрим движение частицы с зарядом q в однородном магнитном поле $\vec{B}$, направленном перпендикулярно к начальной скорости частицы $\vec{v}$ (рис. 1.25). Сила Лоренца зависит от модулей векторов скорости частицы и индукции магнитного поля. Так как магнитное поле не меняет модуль скорости движущейся частицы, то остается неизменным и модуль силы Лоренца. Эта сила перпендикулярна скорости и, следовательно, определяет центростремительное ускорение частицы. Неизменность по модулю центростремительного ускорения частицы, движущейся с постоянной по модулю скоростью, означает, что частица равномерно движется по окружности радиусом r. Определим этот радиус.

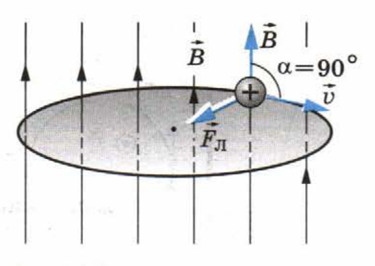


Рис. 1.25

Согласно второму закону Ньютона (см. рис. 1.25)

$$\frac{mv^2}{r} = |q|vB.$$

Отсюда

$$r = \frac{mv}{|q|B}. \qquad (1.6)$$

Время, за которое частица делает полный оборот (период обращения), равно:

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{|q|B}. \qquad (1.7)$$

Использование действия магнитного поля на движущийся заряд. Действие магнитного поля на движущийся заряд широко используют в современной технике. Достаточно упомянуть телевизионные трубки (кинескопы), в которых летящие к экрану электроны отклоняются с помощью магнитного поля, создаваемого особыми катушками.

Сила Лоренца используется в ускорителе заряженных частиц (циклотрон) для получения частиц с большими энергиями. Циклотрон состоит из двух полых полуцилиндров (дуантов) *3*, находящихся в однородном магнитном поле (рис. 1.26). Между дуантами создается переменное

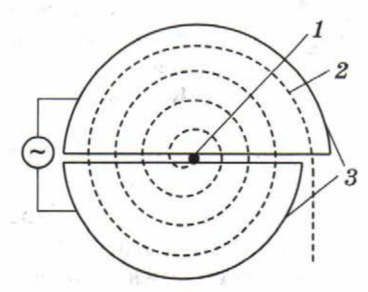


Рис. 1.26



Рис. 1.27

электрическое поле. Согласно формуле (1.6) при увеличении скорости частицы *1* радиус окружности (траектории *2*), по которой движется частица, увеличивается. Период обращения частицы не зависит от скорости (см. формулу (1.7)), и, следовательно, через полпериода, вследствие изменения направления электрического поля, частица снова оказывается в ускоряющем ее поле и т. д. На последнем витке частица вылетает из циклотрона.

На действии магнитного поля основано также и устройство приборов, позволяющих разделять заряженные частицы по их удельным зарядам, т. е. по отношению заряда частицы к ее массе, и по полученным результатам точно определять массы частиц. Такие приборы получили название *масс-спектрографов*.

На рисунке 1.27 изображена принципиальная схема простейшего масс-спектрографа. Вакуумная камера прибора помещена в магнитное поле (вектор индукции $\vec{B}$ перпендикулярен рисунку). Ускоренные электрическим полем заряженные частицы (электроны или ионы), описав дугу, попадают на фотопластинку, где оставляют след, позволяющий с высокой точностью измерить радиус траектории r. По этому радиусу определяется удельный заряд иона. Зная заряд иона, легко вычислить его массу.

На движущуюся заряженную частицу со стороны магнитного поля действует сила Лоренца. Эта сила перпендикулярна скорости и не совершает работы.



1. **Чему равен модуль силы Лоренца?**
2. **Как движется заряженная частица в однородном магнитном поле, если начальная скорость частицы перпендикулярна линиям магнитной индукции?**
3. **Как определить направление силы Лоренца?**

§ 7 МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА

Магнитное поле создается не только электрическими токами, но и постоянными магнитами.

Намагничивание вещества. Постоянные магниты могут быть изготовлены лишь из сравнительно немногих веществ,

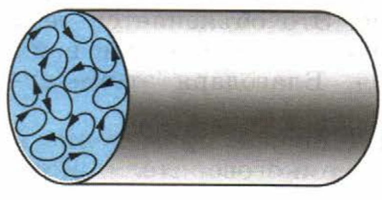
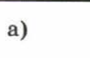
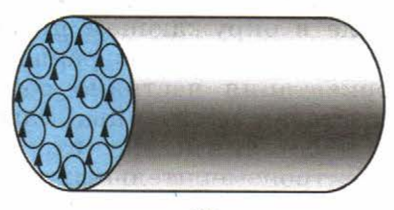
но все вещества, помещенные в магнитное поле, намагничиваются, т. е. сами становятся источниками магнитного поля. В результате этого вектор магнитной индукции при наличии вещества отличается от вектора магнитной индукции в вакууме.

Гипотеза Ампера. Причина, вследствие которой тела обладают магнитными свойствами, была установлена французским ученым Ампером. Сначала, под непосредственным впечатлением от наблюдения за поворачивающейся вблизи проводника с током магнитной стрелкой в опытах Эрстеда Ампер предположил, что магнетизм Земли вызван токами, проходящими внутри земного шара. Главный шаг был сделан: *магнитные свойства тела можно объяснить циркулирующими внутри него токами.* Далее Ампер пришел к общему заключению: *магнитные свойства любого тела определяются замкнутыми электрическими токами внутри него.* Этот решающий шаг от возможности объяснения магнитных свойств тела токами к категорическому утверждению, что магнитные взаимодействия — это взаимодействия токов, — свидетельство большой научной смелости Ампера.

Согласно гипотезе Ампера внутри молекул и атомов циркулируют элементарные электрические токи. (Теперь мы хорошо знаем, что эти токи образуются вследствие движения электронов в атомах.) Если плоскости, в которых циркулируют эти токи, расположены беспорядочно по отношению друг к другу из-за теплового движения молекул (рис. 1.28, *а*), то их действия взаимно компенсируются, и никаких магнитных свойств тело не обнаруживает. В намагниченном состоянии элементарные токи в теле ориентированы так, что их действия складываются (рис. 1.28, *б*).

Гипотеза Ампера объясняет, почему магнитная стрелка и рамка (контур) с током в магнитном поле ведут себя одинаково (см. § 2). Стрелку можно рассматривать как совокупность маленьких контуров с током, ориентированных одинаково.

Наиболее сильные магнитные поля создают вещества, называемые **ферромагнетиками.** Магнитные поля создаются ферромагнетиками не только вследствие обращения электронов вокруг ядер, но и вследствие их собственного

а) б)

Рис. 1.28

вращения. Собственный вращательный момент (момент импульса) электрона называется **спином.** Электроны всегда как бы вращаются вокруг своей оси и, обладая зарядом, создают магнитное поле наряду с полем, появляющимся за счет их орбитального движения вокруг ядер. В ферромагнетиках существуют области с параллельными ориентациями спинов, называемые **доменами**; размеры доменов порядка 0,5 мкм. Параллельная ориентация спинов обеспечивает минимум потенциальной энергии. Если ферромагнетик не намагничен, то ориентация доменов хаотична, и суммарное магнитное поле, создаваемое доменами, равно нулю. При включении внешнего магнитного поля домены ориентируются вдоль линий магнитной индукции этого поля, и индукция магнитного поля в ферромагнетиках увеличивается, становясь в тысячи и даже миллионы раз больше индукции внешнего поля.

Температура Кюри. При температурах, больших некоторой определенной для данного ферромагнетика, его ферромагнитные свойства исчезают. Эту температуру называют **температурой Кюри** по имени открывшего данное явление французского ученого. Если достаточно сильно нагреть намагниченный гвоздь, то он потеряет способность притягивать к себе железные предметы. Температура Кюри для железа 753 °С, для никеля 365 °С, а для кобальта 1000 °С. Существуют ферромагнитные сплавы, у которых температура Кюри меньше 100 °С.

Первые детальные исследования магнитных свойств ферромагнетиков были выполнены выдающимся русским физиком А. Г. Столетовым (1839—1896).

Ферромагнетики и их применение. Хотя ферромагнитных тел в природе не так уж много, именно их магнитные свойства получили наибольшее практическое применение. Железный или стальной сердечник в катушке во много раз усиливает создаваемое ею магнитное поле, не увеличивая силу тока в катушке. Это экономит электроэнергию. Сердечники трансформаторов, генераторов, электродвигателей и т. д. изготовляют из ферромагнетиков.

При выключении внешнего магнитного поля ферромагнетик остается намагниченным, т. е. создает магнитное поле в окружающем пространстве. Это объясняется тем, что домены не возвращаются в прежнее положение и их ориентация частично сохраняется. Благодаря этому существуют постоянные магниты.

Постоянные магниты находят широкое применение в электроизмерительных приборах, громкоговорителях и телефонах, звукозаписывающих аппаратах, магнитных компасах и т. д.

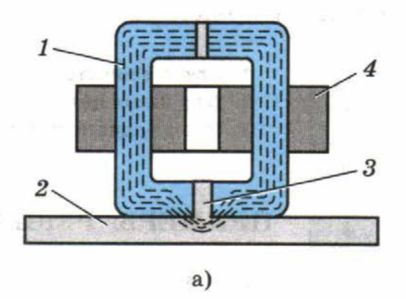
Большое применение получили ферриты — ферромагнитные материалы, не проводящие электрического тока. Они представляют собой химические соединения оксидов железа с оксидами других веществ. Один из известных ферромагнитных материалов — магнитный железняк — является ферритом.

Магнитная запись информации. Из ферромагнетиков изготовляют магнитные ленты и тонкие магнитные пленки. Магнитные ленты широко используют для звукозаписи в магнитофонах и для видеозаписи в видеомагнитофонах.

Магнитная лента представляет собой гибкую основу из полихлорвинила или других веществ. На нее наносится рабочий слой в виде магнитного лака, состоящего из очень мелких игольчатых частиц железа или другого ферромагнетика и связующих веществ.

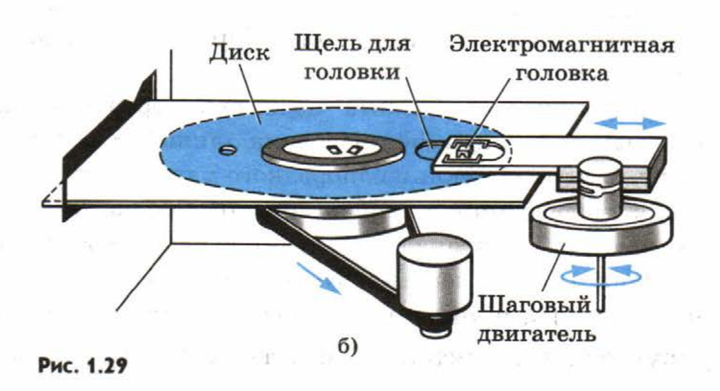
Запись звука производят на ленту с помощью электромагнита, магнитное поле которого изменяется в такт со звуковыми колебаниями. При движении ленты вблизи магнитной головки различные участки пленки намагничиваются. Схема магнитной индукционной головки показана на рисунке 1.29, *а*, где *1* — сердечник электромагнита; *2* — магнитная лента; *3* — рабочий зазор; *4* — обмотка электромагнита.

При воспроизведении звука наблюдается обратный процесс: намагниченная лента возбуждает в магнитной головке электрические сигналы, которые после усиления поступают на динамик магнитофона.



а)

Тонкие магнитные пленки состоят из слоя ферромагнитного материала толщиной от 0,03 до 10 мкм. Их применяют в запоминающих устройствах элек-



б)

Рис. 1.29

тронно-вычислительных машин (ЭВМ). Магнитные пленки предназначены для записи, хранения и воспроизведения информации. Их наносят на тонкий алюминиевый диск или барабан. Информацию записывают и воспроизводят примерно так же, как и в обычном магнитофоне. Запись информации в ЭВМ можно производить и на магнитные ленты.

Развитие технологии магнитной записи привело к появлению магнитных микроголовок, которые используются в ЭВМ, позволяющих создавать немыслимую ранее плотность магнитной записи. На ферромагнитном жестком диске диаметром меньше 8 см хранится до нескольких терабайт (10^{12} байт) информации. Считывание и запись информации на таком диске осуществляется с помощью микроголовки, расположенной на поворотном рычаге (рис. 1.29, *б*). Сам диск вращается с огромной скоростью, и головка плавает над ним в потоке воздуха, что предотвращает возможность механического повреждения диска.

Все вещества, помещенные в магнитное поле, создают собственное поле. Наиболее сильные поля создают ферромагнетики. Из них делают постоянные магниты, так как поле ферромагнетика не исчезает после выключения намагничивающего поля. Ферромагнетики широко применяются на практике.



1. Какие вещества называют ферромагнетиками?
2. Для каких целей применяют ферромагнитные материалы?
3. Как осуществляется запись информации в ЭВМ?



ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Решение задач с применением закона Ампера (и использованием выражения для силы Лоренца) аналогично решению задач механики. Кроме механических сил, надо учитывать силу Ампера (или силу Лоренца) и правильно определять ее направление.

1. Между полюсами магнита подвешен горизонтально на двух невесомых нитях прямой проводник длиной $l = 0{,}2$ м и массой $m = 10$ г. Вектор индукции однородного магнитного поля перпендикулярен проводнику и направлен вертикально; $B = 49$ мТл. На какой угол α от вертикали отклонятся нити, поддерживающие проводник, если по нему пропустить ток? Сила тока $I = 2$ А.

Решение. На проводник действуют следующие силы: силы упругости двух нитей $\vec{T}$, сила тяжести $m\vec{g}$ и сила Ам-

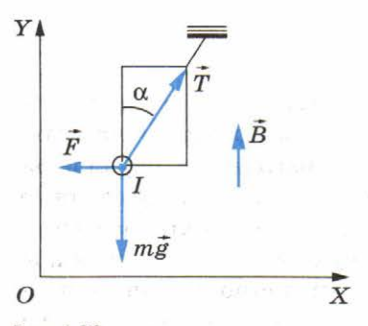


Рис. 1.30

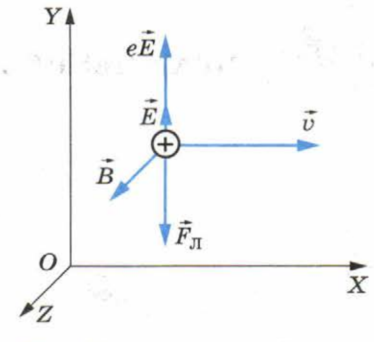


Рис. 1.31

пера $\vec{F}$ (рис. 1.30). Модуль силы Ампера $F = IBl$. При равновесии проводника суммы проекций сил на вертикальное и горизонтальное направления (с учетом их знаков) равны нулю:

$$-mg + T\cos\alpha = 0,$$
$$-F + T\sin\alpha = 0.$$

Отсюда

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{F}{mg} = \frac{IBl}{mg} \approx 0{,}2.$$

Следовательно, угол $\alpha = 11{,}3°$.

2. В пространстве, где созданы одновременно однородные и постоянные электрическое и магнитное поля, по прямолинейной траектории движется протон. Известно, что напряженность электрического поля равна $\vec{E}$. Определите индукцию $\vec{B}$ магнитного поля.

Решение. Прямолинейное движение протона возможно в двух случаях.

1) Вектор $\vec{E}$ направлен вдоль траектории движения протона. Тогда вектор $\vec{B}$ также должен быть направлен вдоль этой траектории, и его модуль может быть любым, так как магнитное поле не будет действовать на частицу.

2) Векторы $\vec{E}$, $\vec{B}$ и $\vec{v}$ взаимно перпендикулярны, и сила, действующая на протон со стороны электрического поля, равна по модулю и противоположна по направлению силе Лоренца, действующей на протон со стороны магнитного поля (рис. 1.31). Так как

$$e\vec{E} + \vec{F}_{л} = 0,$$

то

$$eE - evB = 0 \text{ и } B = \frac{E}{v}.$$



УПРАЖНЕНИЕ 1

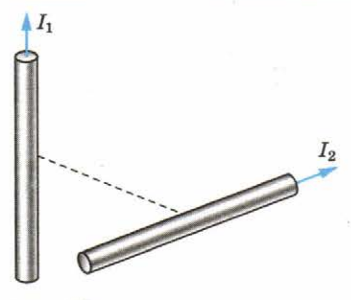


Рис. 1.32

1. Используя правило буравчика и правило левой руки, покажите, что токи, направленные параллельно, притягиваются, а направленные противоположно — отталкиваются.

2. По двум скрещивающимся под прямым углом прямолинейным проводникам пропускают токи. Силы токов I_1 и I_2 (рис. 1.32). Как будет изменяться расположение проводников относительно друг друга?

3. Проводник длиной $l = 0{,}15$ м перпендикулярен вектору магнитной индукции однородного магнитного поля, модуль которого $B = 0{,}4$ Тл. Сила тока в проводнике $I = 8$ А. Определите работу силы Ампера, которая была совершена при перемещении проводника на 0,025 м по направлению действия этой силы.

4. Определите радиус окружности и период обращения электрона в однородном магнитном поле с индукцией $B = 0{,}01$ Тл. Скорость электрона перпендикулярна вектору магнитной индукции и равна 10^6 м/с.

КРАТКИЕ ИТОГИ ГЛАВЫ 1

1. Взаимодействие электрических токов осуществляется посредством магнитного поля. Основной характеристикой магнитного поля является вектор магнитной индукции $\vec{B}$.
   Модуль вектора магнитной индукции определяется отношением максимальной силы, действующей на отрезок проводника с током со стороны магнитного поля, к произведению силы тока на длину этого отрезка.
2. Линии магнитной индукции всегда замкнуты. Магнитное поле является вихревым.
3. Согласно закону Ампера на отрезок проводника с током длиной Δl со стороны магнитного поля действует сила, модуль которой равен $F = I\,|\vec{B}|\,l \sin\alpha$, где α — угол между направлением тока и вектором $\vec{B}$; I — сила тока в проводнике. Направление силы определяется по правилу левой руки.
4. На движущуюся заряженную частицу в магнитном поле действует сила Лоренца, модуль которой равен

$F_{\text{Л}} = |q| vB \sin\alpha$, где α — угол между скоростью частицы и вектором $\vec{B}$. Сила Лоренца перпендикулярна скорости частицы и вектору $\vec{B}$.

5. Все тела в магнитном поле намагничиваются, т. е. сами создают магнитное поле.
   У большинства веществ магнитные свойства выражены довольно слабо. Лишь в ферромагнетиках, к которым относится железо, индукция магнитного поля существенно увеличивается. Хотя ферромагнетиков сравнительно немного, но они имеют очень большое практическое значение, так как позволяют во много раз увеличивать индукцию магнитного поля без затрат энергии.

Глава 2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

До сих пор мы рассматривали электрические и магнитные поля, не изменяющиеся с течением времени. Было выяснено, что электростатическое поле создается неподвижными заряженными частицами, а магнитное поле — движущимися, т. е. электрическим током. Теперь познакомимся с *электрическими и магнитными полями, которые меняются со временем*.

Самый важный факт, который удалось обнаружить, — это теснейшая взаимосвязь между электрическим и магнитным полями. Оказалось, что изменяющееся во времени магнитное поле порождает электрическое поле, а изменяющееся электрическое поле — магнитное. Без этой связи между полями разнообразие проявлений электромагнитных сил не было бы столь обширным, каким оно наблюдается на самом деле. Не существовало бы ни радиоволн, ни света.

§ 8 ОТКРЫТИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

В 1821 г. М. Фарадей записал в своем дневнике: «Превратить магнетизм в электричество». Через 10 лет эта задача была им решена.

Не случайно первый, решающий шаг в открытии новых свойств электромагнитных взаимодействий сделан основоположником представлений об электромагнитном поле М. Фарадеем, который был уверен в единой природе электрических и магнитных явлений. Благодаря этому он и сделал открытие, вошедшее в основу устройства генерато-

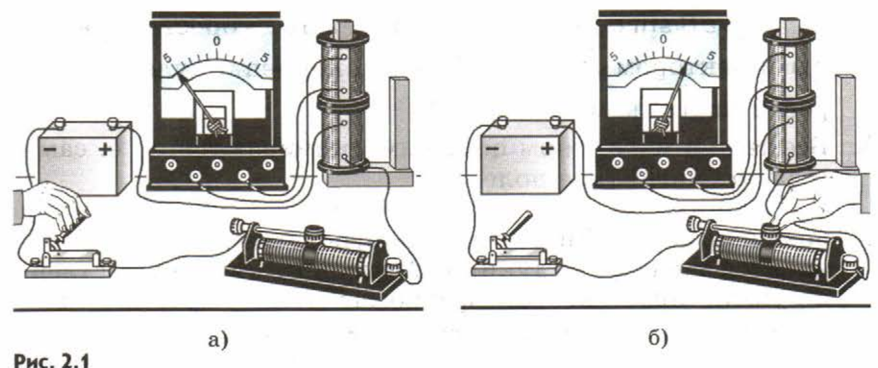


Рис. 2.1

ров всех электростанций мира, превращающих механическую энергию в энергию электрического тока. (Источники, работающие на других принципах: гальванические элементы, аккумуляторы и пр., — дают ничтожную долю вырабатываемой электрической энергии.)

Электрический ток, рассуждал М. Фарадей, способен намагнитить кусок железа. Не может ли магнит, в свою очередь, вызвать появление электрического тока? Долгое время эту связь обнаружить не удавалось. Трудно было додуматься до главного, а именно: движущийся магнит, или меняющееся во времени магнитное поле, может возбудить электрический ток в катушке.

Какого рода случайности могли помешать открытию, показывает следующий факт. Почти одновременно с Фарадеем получить электрический ток в катушке с помощью магнита пытался швейцарский физик Колладон. В ходе работы он пользовался гальванометром, легкая магнитная стрелка которого помещалась внутри катушки прибора. Чтобы магнит не оказывал непосредственного влияния на стрелку, концы катушки, куда Колладон вводил магнит, надеясь получить в ней ток, были выведены в соседнюю комнату и там присоединены к гальванометру. Вставив магнит в катушку, Колладон шел в соседнюю комнату и с огорчением убеждался, что гальванометр не показывает тока. Стоило бы ему все время наблюдать за гальванометром, а кого-нибудь попросить заняться магнитом, замечательное открытие было бы сделано. Но этого не случилось. Покоящийся относительно катушки магнит не вызывает в ней тока.

Явление электромагнитной индукции заключается в возникновении электрического тока в проводящем контуре, который либо покоится в переменном во времени магнитном поле, либо движется в постоянном магнитном поле таким образом, что число линий магнитной индукции, пронизывающих контур, меняется. Это явление было открыто

29 августа 1831 г. Редкий случай, когда дата нового замечательного открытия известна так точно!

Сначала Фарадеем была открыта электромагнитная индукция в неподвижных относительно друг друга проводниках при замыкании и размыкании цепи. Затем, ясно понимая, что сближение или удаление проводников с током должно приводить к тому же результату, что и замыкание и размыкание цепи, Фарадей с помощью опытов доказал: ток возникает при перемещении катушек относительно друг друга. Знакомый с трудами Ампера, Фарадей понимал, что магнит — это совокупность маленьких токов, циркулирующих в молекулах. 17 октября, как зарегистрировано в его лабораторном журнале, был обнаружен индукционный ток в катушке во время введения (или удаления) магнита.

В течение одного месяца Фарадей опытным путем установил все главные особенности явления электромагнитной индукции. В настоящее время опыты Фарадея может повторить каждый. Для этого надо иметь две катушки, магнит, батарею элементов и достаточно чувствительный гальванометр.

В установке, изображенной на рисунке 2.1, *а*, индукционный ток возникает в одной из катушек в момент замыкания или размыкания электрической цепи другой катушки, неподвижной относительно первой. В других опытах индукционный ток возникает при изменении силы тока в одной из катушек с помощью реостата (рис. 2.1, *б*), при движении катушек относительно друг друга (рис. 2.2, *а*), при движении постоянного магнита относительно катушки (рис. 2.2, *б*).

Уже сам Фарадей заметил то общее, от чего зависит появление индукционного тока в опытах, которые поставлены по-разному.

В замкнутом проводящем контуре возникает ток при изменении числа линий магнитной индукции, пронизывающих поверхность, ограниченную этим контуром.

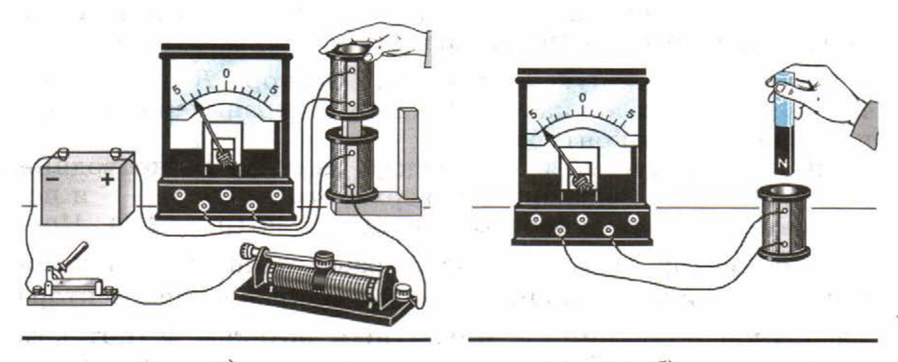


Рис. 2.2

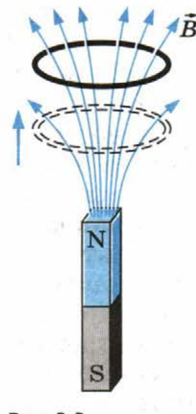


Рис. 2.3

И чем быстрее меняется число линий магнитной индукции, тем больше возникающий индукционный ток. При этом причина изменения числа линий магнитной индукции не существенна. Это может быть и изменение числа линий магнитной индукции, пронизывающих поверхность, ограниченную неподвижным проводящим контуром, вследствие изменения силы тока в соседней катушке (см. рис. 2.1, *б*), и изменение числа линий индукции вследствие движения контура в неоднородном магнитном поле, густота линий которого меняется в пространстве (рис. 2.3).

В проводящем замкнутом контуре возникает электрический ток, если контур находится в переменном магнитном поле или движется в постоянном во времени магнитном поле так, что число линий магнитной индукции, пронизывающих контур, меняется.



1. **В чем главное отличие переменных электрических и магнитных полей от постоянных?**
2. **В чем заключается явление электромагнитной индукции?**
3. **Как должен двигаться замкнутый проводящий контур в однородном магнитном поле, не зависящем от времени: поступательно или вращательно, чтобы в нем возник индукционный ток?**

§ 9 МАГНИТНЫЙ ПОТОК

Для того чтобы дать точную количественную формулировку закона электромагнитной индукции Фарадея, нужно ввести новую величину — поток вектора магнитной индукции.

Вектор магнитной индукции $\vec{B}$ характеризует магнитное поле в каждой точке пространства. Можно ввести еще одну величину, зависящую от значений вектора $\vec{B}$ не в одной точке, а во всех точках поверхности, ограниченной плоским замкнутым контуром.

Для этого рассмотрим плоский замкнутый проводник (контур), ограничивающий поверхность площадью S и помещенный в однородное магнитное поле (рис. 2.4). Нормаль $\vec{n}$ (вектор, модуль которого равен единице) к плоскости проводника составляет угол α с направлением вектора магнитной индукции $\vec{B}$. **Магнитным потоком Ф (потоком вектора магнитной индукции)** через поверхность площадью S называют величину, равную произведению модуля

вектора магнитной индукции $\vec{B}$ на площадь S и косинус угла α между векторами $\vec{B}$ и $\vec{n}$:

$$\Phi = BS\cos\alpha. \qquad (2.1)$$

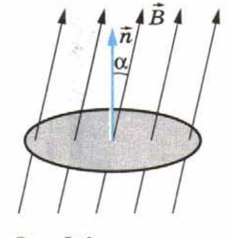


Рис. 2.4

Произведение $B\cos\alpha = B_n$ представляет собой проекцию вектора магнитной индукции на нормаль $\vec{n}$ к плоскости контура. Поэтому

$$\boxed{\Phi = B_n S.} \qquad (2.2)$$

Магнитный поток тем больше, чем больше B_n и S. Величина Ф названа «магнитным потоком» по аналогии с потоком воды, который тем больше, чем больше скорость течения воды и площадь сечения трубы.

Магнитный поток графически можно истолковать как величину, пропорциональную числу линий магнитной индукции, пронизывающих поверхность площадью S.

Единицей магнитного потока является *вебер. Магнитный поток в* 1 *вебер* (1 Вб) *создается однородным магнитным полем с индукцией* 1 Тл *через поверхность площадью* 1 м^2, *расположенную перпендикулярно вектору магнитной индукции.*

Магнитный поток зависит от ориентации поверхности, которую пронизывает магнитное поле.

§ 10 НАПРАВЛЕНИЕ ИНДУКЦИОННОГО ТОКА. ПРАВИЛО ЛЕНЦА

Присоединив катушку, в которой возникает индукционный ток, к гальванометру, можно обнаружить, что направление этого тока зависит от того, приближается ли магнит к катушке (например, северным полюсом) или удаляется от нее (см. рис. 2.2, *б*).

Возникающий индукционный ток того или иного направления как-то взаимодействует с магнитом (притягивает или отталкивает его). Катушка с проходящим по ней током подобна магниту с двумя полюсами — северным и южным. Направление индукционного тока определяет, какой конец катушки выполняет роль северного полюса (линии магнитной индукции выходят из него). На основе закона сохранения энергии можно предсказать, в каких случаях катушка будет притягивать магнит, а в каких отталкивать его.

Взаимодействие индукционного тока с магнитом. Если магнит приближать к катушке, то в ней появляется индук-

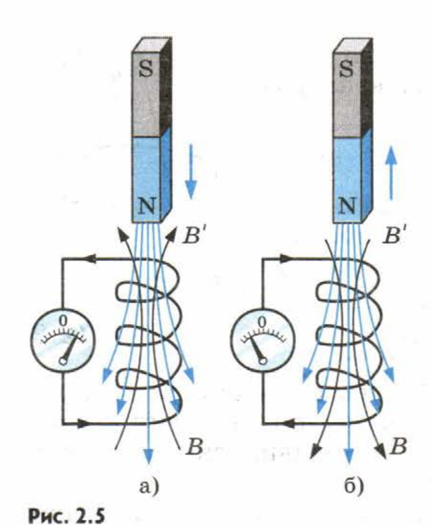


Рис. 2.5

ционный ток такого направления, что магнит обязательно отталкивается. Для сближения магнита и катушки нужно совершить положительную работу. Катушка становится подобной магниту, обращенному одноименным полюсом к приближающемуся к ней магниту. Одноименные же полюса отталкиваются.

При удалении магнита, наоборот, в катушке возникает ток такого направления, чтобы появилась притягивающая магнит сила.

В чем состоит различие двух опытов: приближение магнита к катушке и его удаление? В первом случае число линий магнитной индукции, пронизывающих витки катушки, или, что то же самое, магнитный поток, увеличивается (рис. 2.5, *а*), а во втором случае уменьшается (рис. 2.5, *б*). Причем в первом случае линии индукции $\vec{B}'$ магнитного поля, созданного возникшим в катушке индукционным током, выходят из верхнего конца катушки, так как катушка отталкивает магнит, а во втором случае, наоборот, входят в этот конец. Эти линии магнитной индукции на рисунке 2.5 изображены черным цветом. В случае *а* катушка с током аналогична магниту, северный полюс которого находится сверху, а в случае *б* — снизу.

Аналогичные выводы можно сделать с помощью опыта, показанного на рисунке 2.6. На концах стержня, который может свободно вращаться вокруг вертикальной оси, закреплены два проводящих алюминиевых кольца. Одно из них с разрезом. Если поднести магнит к кольцу без разреза, то в нем возникнет индукционный ток и направлен он будет так, что это кольцо оттолкнется от магнита и стержень повернется. Если удалять магнит от кольца, то оно, наоборот, притянется к магниту. С разрезанным кольцом магнит не взаимодействует, так как разрез препятствует возникновению в кольце индукционного тока. Отталкивает или притягивает катушка магнит, это зависит от направления индукционного тока в ней. Поэтому закон сохранения энергии позволяет сформулировать правило, определяющее направление индукционного тока.

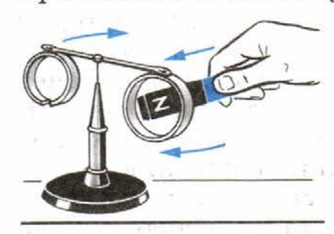


Рис. 2.6

Правило Ленца. Теперь мы подошли к главному: при увеличении магнитного потока через витки катушки индукционный ток имеет такое направление, что создаваемое им магнитное поле препятствует усилению магнитного потока через витки катушки. Ведь линии индукции $\vec{B}'$ этого поля направлены против линий индукции $\vec{B}$ поля, изменение которого порождает электрический ток. Если же магнитный поток через катушку ослабевает, то индукционный ток создает магнитное поле с индукцией $\vec{B}'$, увеличивающее магнитный поток через витки катушки.

В этом и состоит сущность общего правила определения направления индукционного тока, которое применимо во всех случаях. Это правило было установлено русским физиком Э. Х. Ленцем.

Согласно правилу Ленца ***возникающий в замкнутом контуре индукционный ток своим магнитным полем противодействует тому изменению магнитного потока, которым он вызван.*** Более кратко это правило можно сформулировать следующим образом: индукционный ток направлен так, чтобы препятствовать причине, его вызывающей.

Применять правило Ленца для нахождения направления индукционного тока в контуре надо так:

1. Определить направление линий магнитной индукции $\vec{B}$ внешнего магнитного поля.

2. Выяснить, увеличивается ли поток вектора магнитной индукции этого поля через поверхность, ограниченную контуром ($\Delta\Phi > 0$), или уменьшается ($\Delta\Phi < 0$).

3. Установить направление линий магнитной индукции $\vec{B}'$ магнитного поля индукционного тока. Эти линии должны быть согласно правилу Ленца направлены противоположно линиям магнитной индукции $\vec{B}$ при $\Delta\Phi > 0$ и иметь одинаковое с ними направление при $\Delta\Phi < 0$.

4. Зная направление линий магнитной индукции $\vec{B}'$, найти направление индукционного тока, пользуясь правилом буравчика.

Направление индукционного тока определяется с помощью закона сохранения энергии. Индукционный ток во всех случаях направлен так, чтобы своим магнитным полем препятствовать изменению магнитного потока, вызывающего данный индукционный ток.



1. **Как определяется направление индукционного тока?**
2. **Возникнет ли в кольце с разрезом электрическое поле, если подносить к нему магнит?**

§ 11 ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Сформулируем закон электромагнитной индукции количественно. Опыты Фарадея показали, что сила индукционного тока I_i в проводящем контуре пропорциональна скорости изменения числа линий магнитной индукции $\vec{B}$, пронизывающих поверхность, ограниченную этим контуром. Более точно это утверждение можно сформулировать, используя понятие «магнитный поток».

Магнитный поток можно графически представить как число линий магнитной индукции, пронизывающих поверхность площадью S. Чем больше индукция магнитного поля, тем большее число линий магнитной индукции пронизывает эту поверхность. Поэтому скорость изменения этого числа есть не что иное, как скорость изменения магнитного потока.

Если за малое время Δt магнитный поток меняется на $\Delta\Phi$, то скорость изменения магнитного потока равна $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$. Поэтому утверждение, которое вытекает непосредственно из опыта, можно сформулировать так: *сила индукционного тока пропорциональна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром*:

$$I_i \sim \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \qquad (2.3)$$

ЭДС индукции. Известно, что в цепи появляется электрический ток в том случае, когда на свободные заряды проводника действуют сторонние силы. Величину, численно равную работе этих сил при перемещении единичного положительного заряда вдоль замкнутого контура, называют **электродвижущей силой**. Следовательно, при изменении магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, в контуре появляются сторонние силы, действие которых характеризует ЭДС, называемая **ЭДС индукции**. Обозначают ее буквой $\mathscr{E}_i$.

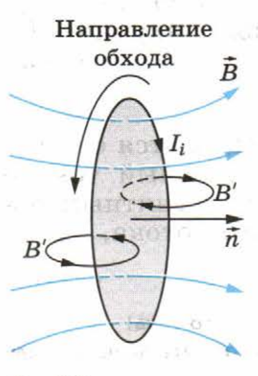


Рис. 2.7

Согласно закону Ома для замкнутой цепи $I_i = \frac{\mathscr{E}_i}{R}$. Сопротивление проводника не зависит от изменения магнитного потока. Следовательно, соотношение (2.3) справедливо только потому, что ЭДС индукции пропорциональна $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.

Закон электромагнитной индукции. Закон электромагнитной индукции фор-

мулируется именно для ЭДС, а не для силы индукционного тока, т. к. сила тока зависит и от свойств проводника, а ЭДС определяется только изменением магнитного потока. Согласно закону электромагнитной индукции ***ЭДС индукции в замкнутом контуре равна по модулю скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром***:

$$\mathscr{E}_i = \left|\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\right|.$$

Как в законе электромагнитной индукции учесть направление индукционного тока (или знак ЭДС индукции) в соответствии с правилом Ленца?

На рисунке 2.7 изображен замкнутый контур. Будем считать положительным направление обхода контура против часовой стрелки. Нормаль $\vec{n}$ к контуру образует правый винт с направлением обхода.

Пусть магнитная индукция $\vec{B}$ внешнего магнитного поля направлена вдоль нормали к контуру и возрастает со временем. Тогда $\Phi > 0$ и $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} > 0$. Согласно правилу Ленца индукционный ток создает магнитный поток $\Phi' < 0$. Линии индукции B' магнитного поля индукционного тока изображены на рисунке 2.7 черным цветом. Следовательно, индукционный ток согласно правилу буравчика направлен по часовой стрелке (против направления положительного обхода) и ЭДС индукции отрицательна. Поэтому в формуле для закона электромагнитной индукции должен стоять знак «–», указывающий на то, что $\mathscr{E}_i$ и $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ имеют разные знаки:

$$\boxed{\mathscr{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.} \qquad (2.4)$$

ЭДС индукции определяется скоростью изменения магнитного потока.



1. Что называется магнитным потоком (потоком магнитной индукции)?
2. Почему закон электромагнитной индукции формулируется для ЭДС, а не для силы тока?
3. Как формулируется закон электромагнитной индукции?
4. Почему в формуле для закона электромагнитной индукции стоит знак «–»?

§ 12 ВИХРЕВОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Магнитный поток $\Phi = BS \cos \alpha$. Изменение магнитного потока через контур может происходить: 1) в случае неподвижного проводящего контура, помещенного в изменяющееся во времени поле; 2) в случае проводника, движущегося в магнитном поле, которое может и не меняться со временем. Значение ЭДС индукции в обоих случаях определяется законом (2.4), но происхождение этой ЭДС различно.

Рассмотрим сначала первый случай возникновения индукционного тока. Поместим круговой проволочный виток радиусом r в переменное во времени однородное магнитное поле (рис. 2.8). Пусть индукция магнитного поля увеличивается, тогда будет увеличиваться со временем и магнитный поток через поверхность, ограниченную витком. Согласно закону электромагнитной индукции в витке появится индукционный ток. При изменении индукции магнитного поля по линейному закону индукционный ток будет постоянен.

Какие же силы заставляют заряды в витке двигаться? Само магнитное поле, пронизывающее катушку, этого сделать не может, так как магнитное поле действует исключительно на движущиеся заряды (этим-то оно и отличается от электрического), а проводник с находящимися в нем электронами неподвижен.

Кроме магнитного поля, на заряды, причем как на движущиеся, так и на неподвижные, действует еще электрическое поле. Но ведь те поля, о которых пока шла речь (электростатическое или стационарное), создаются электрическими зарядами, а индукционный ток появляется в результате действия меняющегося магнитного поля. Поэтому можно предположить, что *электроны в неподвижном проводнике приводятся в движение электрическим полем и это поле непосредственно порождается меняющимся магнитным полем.* Тем самым утверждается новое фундаментальное свойство поля: ***изменяясь во времени, магнитное поле порождает электрическое поле.*** К этому выводу впервые пришел Дж. Максвелл.

Теперь явление электромагнитной индукции предстает перед нами в новом свете. Главное в нем — это процесс порождения полем магнитным поля электрического. При этом наличие проводящего контура, например катушки, не меняет существа процесса. Проводник с запасом свободных электронов (или других частиц) играет роль прибора: он лишь позволяет обнаружить возникаю-

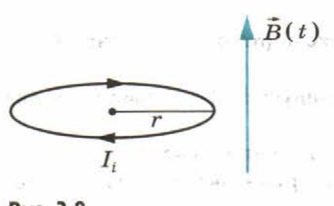


Рис. 2.8

щее электрическое поле. Поле приводит в движение электроны в проводнике и тем самым обнаруживает себя. Сущность явления электромагнитной индукции в неподвижном проводнике состоит не столько в появлении индукционного тока, сколько в возникновении электрического поля, которое приводит в движение электрические заряды.

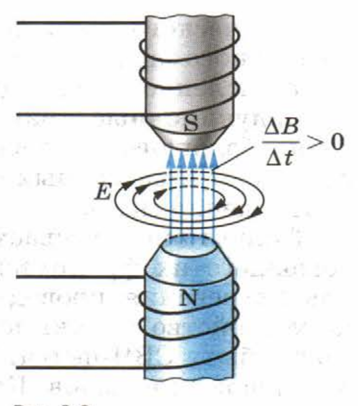


Рис. 2.9

Электрическое поле, возникающее при изменении магнитного поля, имеет совсем другую природу, чем электростатическое. Оно не связано непосредственно с электрическими зарядами, и его линии напряженности не могут на них начинаться и кончаться. Они вообще нигде не начинаются и не кончаются, а представляют собой замкнутые линии, подобные линиям индукции магнитного поля. Это так называемое **вихревое электрическое поле** (рис. 2.9).

Чем быстрее меняется магнитная индукция, тем больше напряженность электрического поля. Согласно правилу Ленца при *возрастании* магнитной индукции $\left(\frac{\Delta B}{\Delta t} > 0\right)$ направление вектора напряженности $\vec{E}$ электрического поля образует *левый* винт с направлением вектора $\vec{B}$. Это означает, что при вращении винта с левой нарезкой в направлении линий напряженности электрического поля поступательное перемещение винта совпадает с направлением вектора магнитной индукции. Напротив, при *убывании* магнитной индукции $\left(\frac{\Delta B}{\Delta t} < 0\right)$ направление вектора напряженности $\vec{E}$ образует *правый* винт с направлением вектора $\vec{B}$.

Направление силовых линий напряженности $\vec{E}$ совпадает с направлением индукционного тока. Сила, действующая со стороны вихревого электрического поля на заряд q (сторонняя сила), по-прежнему равна $\vec{F} = q\vec{E}$. Но в отличие от случая стационарного электрического поля работа вихревого поля по перемещению заряда q на замкнутом пути не равна нулю. Ведь при перемещении заряда вдоль замкнутой линии напряженности электрического поля работа на всех участках пути имеет один и тот же знак, так как сила и перемещение совпадают по направлению. **Работа вихревого**

электрического поля при перемещении единичного положительного заряда вдоль замкнутого неподвижного проводника численно равна ЭДС индукции в этом проводнике.

Индукционные токи в массивных проводниках. Особенно большого числового значения индукционные токи достигают в массивных проводниках, из-за того, что их сопротивление мало.

Такие токи, называемые *токами Фуко* по имени исследовавшего их французского физика, можно использовать для нагревания проводников. На этом принципе основано устройство индукционных печей, например используемых в быту СВЧ-печей. Также этот принцип используется для плавки металлов. Кроме этого явление электромагнитной индукции используется в детекторах металла, устанавливаемых при входах в здания аэровокзалов, театров и т. д.

Однако во многих устройствах возникновение токов Фуко приводит к бесполезным и даже нежелательным потерям энергии на выделение тепла. Поэтому железные сердечники трансформаторов, электродвигателей, генераторов и т. д. делают не сплошными, а состоящими из отдельных пластин, изолированных друг от друга. Поверхности пластин должны быть перпендикулярны направлению вектора напряженности вихревого электрического поля. Сопротивление электрическому току пластин будет при этом максимальным, а выделение тепла — минимальным.

Применение ферритов. Радиоэлектронная аппаратура работает в области очень высоких частот (миллионы колебаний в секунду). Здесь применение сердечников катушек из отдельных пластин уже не дает нужного эффекта, так как большие токи Фуко возникают в каждой пластине.

В § 7 отмечалось, что существуют магнитные изоляторы — ферриты. При перемагничивании в ферритах не возникают вихревые токи. В результате потери энергии на выделение в них тепла сводятся к минимуму. Поэтому из ферритов делают сердечники высокочастотных трансформаторов, магнитные антенны транзисторов и др. Ферритовые сердечники изготовляют из смеси порошков исходных веществ. Смесь прессуется и подвергается значительной термической обработке.

При быстром изменении магнитного поля в обычном ферромагнетике возникают индукционные токи, магнитное поле которых, в соответствии с правилом Ленца, препятствует изменению магнитного потока в сердечнике катушки. Из-за этого поток магнитной индукции практически не меняется и сердечник не перемагничивается. В ферритах вихревые токи очень малы, поэтому их можно быстро перемагничивать.

Наряду с потенциальным кулоновским электрическим полем существует вихревое электрическое поле. Линии напряженности этого поля замкнуты. Вихревое поле порождается меняющимся магнитным полем.



1. **Какова природа сторонних сил, вызывающих появление индукционного тока в неподвижном проводнике?**
2. **В чем отличие вихревого электрического поля от электростатического или стационарного?**
3. **Что такое токи Фуко?**
4. **В чем преимущества ферритов по сравнению с обычными ферромагнетиками?**

§ 13 ЭДС ИНДУКЦИИ В ДВИЖУЩИХСЯ ПРОВОДНИКАХ

Рассмотрим теперь второй случай возникновения индукционного тока.

При движении проводника его свободные заряды движутся вместе с ним. Поэтому на заряды со стороны магнитного поля действует сила Лоренца. Она-то и вызывает перемещение зарядов внутри проводника. ЭДС индукции, следовательно, имеет магнитное происхождение.

На многих электростанциях земного шара именно сила Лоренца вызывает перемещение электронов в движущихся проводниках.

Вычислим ЭДС индукции, возникающую в проводнике, движущемся в однородном магнитном поле (рис. 2.10). Пусть сторона контура MN длиной l скользит с постоянной скоростью $\vec{v}$ вдоль сторон NC и MD, оставаясь все время параллельной стороне CD. Вектор магнитной индукции $\vec{B}$ однородного поля перпендикулярен проводнику и составляет угол α с направлением его скорости.

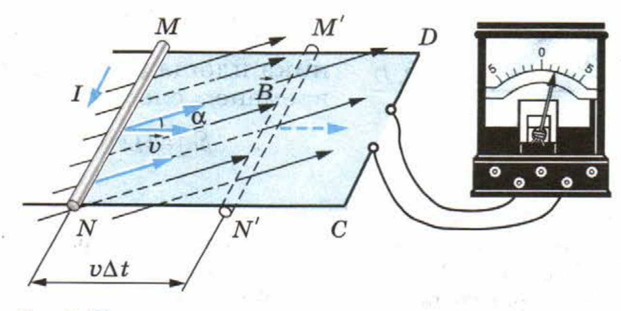


Рис. 2.10

Сила, с которой магнитное поле действует на движущуюся заряженную частицу, равна по модулю

$$F_{\text{Л}} = |q|vB\sin\alpha. \qquad (2.5)$$

Направлена эта сила вдоль проводника MN. Работа силы Лоренца[1] на пути l положительна и составляет:

$$A = F_{\text{Л}}l = |q|vBl\sin\alpha.$$

Электродвижущая сила индукции в проводнике MN равна, по определению, отношению работы по перемещению заряда q к этому заряду:

$$\mathscr{E}_i = \frac{A}{|q|} = vBl\sin\alpha. \qquad (2.6)$$

Эта формула справедлива для любого проводника длиной l, движущегося со скоростью $\vec{v}$ в однородном магнитном поле.

В других проводниках контура ЭДС равна нулю, так как эти проводники неподвижны. Следовательно, ЭДС во всем контуре $MNCD$ равна $\mathscr{E}_i$ и остается неизменной, если скорость движения $\vec{v}$ постоянна. Электрический ток при этом будет увеличиваться, так как при смещении проводника MN вправо уменьшается общее сопротивление контура.

ЭДС индукции можно вычислить также и с помощью закона электромагнитной индукции (см. формулу (2.4)). Действительно, магнитный поток через контур $MNCD$ равен:

$$\Phi = BS\cos(90° - \alpha) = BS\sin\alpha,$$

где угол $(90° - \alpha)$ есть угол между вектором $\vec{B}$ и нормалью $\vec{n}$ к поверхности контура (рис. 2.11, вид сбоку), а S — площадь, ограниченная контуром $MNCD$. Если считать, что в начальный момент времени ($t = 0$) проводник MN находится на расстоянии NC от проводника CD (см. рис. 2.10), то при перемещении проводника площадь S изменяется со временем следующим образом:

$$S = l(NC - vt).$$

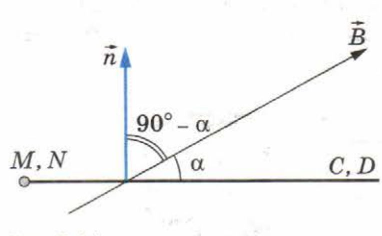


Рис. 2.11

[1] Это неполная работа силы Лоренца. Кроме силы Лоренца (см. формулу (2.5)), имеется составляющая силы Лоренца, направленная против скорости $\vec{v}$ проводника. Эта составляющая тормозит движение проводника и совершает отрицательную работу. В результате полная работа силы Лоренца оказывается равной нулю.

За время Δt площадь контура меняется на $\Delta S = -lv\Delta t$. Знак «–» указывает на то, что она уменьшается. Изменение магнитного потока за это время равно:

$$\Delta\Phi = -Blv\,\Delta t \sin\alpha.$$

Следовательно,

$$\mathscr{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = Blv \sin\alpha.$$

Если весь контур *MNCD* движется в однородном магнитном поле, сохраняя свою ориентацию по отношению к вектору $\vec{B}$, то ЭДС индукции в контуре будет равна нулю, так как поток Ф через поверхность, ограниченную контуром, не меняется. Объяснить это можно так. При движении контура в проводниках *MN* и *CD* возникают силы (см. формулу (2.5)), действующие на электроны в направлениях от *N* к *M* и от *C* к *D*. Суммарная работа этих сил при обходе контура по часовой стрелке или против нее равна нулю.

ЭДС индукции возникает также при повороте рамки в магнитном поле, т. е. при изменении со временем угла α (см. § 31).

ЭДС индукции в проводниках, движущихся в постоянном магнитном поле, возникает за счет действия на заряды проводника силы Лоренца.



1. Чему равна сила Лоренца и как она направлена?

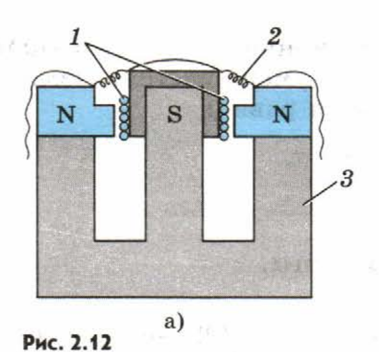
2. От чего зависит ЭДС индукции, возникающая в проводнике, который движется в переменном во времени магнитном поле?

§ 14 ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ МИКРОФОН

В главе 1 вы ознакомились с электродинамическим громкоговорителем, преобразующим колебания электрического тока в звуковые колебания. Обратный процесс превращения звуковых колебаний воздуха в колебания электрического тока осуществляется с помощью микрофона.

Микрофоны широко применяются в радиовещании, телевидении, системах усиления звука и звукозаписи, для телефонной связи.

Действие одного из самых распространенных микрофонов — электродинамического — основано на явлении электромагнитной индукции. Этот микрофон устроен следующим образом. Диафрагма *2* из тонкой полистирольной



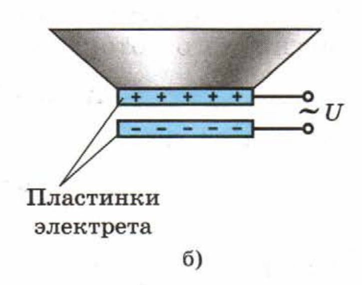


Рис. 2.12

пленки или алюминиевой фольги жестко связана со звуковой катушкой *1* из тонкой проволоки (рис. 2.12). Катушка помещается в кольцевом зазоре сильного постоянного магнита *3*. Линии магнитной индукции перпендикулярны к виткам катушки.

Звуковая волна вызывает колебания диафрагмы и связанной с ней катушки. При движении витков катушки в магнитном поле в них возникает переменная ЭДС индукции. В результате на зажимах катушки появляется переменное напряжение, вызывающее колебания электрического тока в цепи микрофона. Эти колебания после усиления могут быть поданы на громкоговоритель, записаны на магнитной ленте и т. д.

Электродинамические микрофоны просты по конструкции, имеют небольшие габариты и надежны в эксплуатации. Искажения преобразуемых колебаний в интервале частот от 50 до 10 000 Гц невелики.

В телефонных аппаратах применяют менее совершенные, но зато более дешевые угольные микрофоны. Диафрагма в таких микрофонах действует на угольный порошок и создает в нем периодические сжатия и разрежения. От этого меняются сопротивление порошка и сила тока в электрической цепи микрофона. Существуют и другие типы микрофонов.

В громкоговорителе сила Ампера вызывает колебания катушки и связанной с ней диафрагмы.

В микрофоне колебания диафрагмы передаются подвижной катушке, и в ней возникает индукционный ток.



Можно ли использовать в качестве чувствительного элемента микрофона одну из обкладок конденсатора, колеблющуюся под действием звуковой волны?

§ 15 САМОИНДУКЦИЯ. ИНДУКТИВНОСТЬ

Самоиндукция. Если по катушке идет переменный ток, то магнитный поток, пронизывающий катушку, меняется. Поэтому в том же самом проводнике, по которому идет переменный ток, возникает ЭДС индукции. Это явление называют **самоиндукцией.**

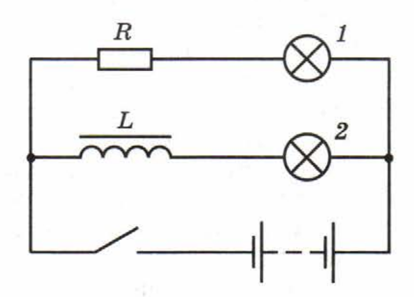


Рис. 2.13

При самоиндукции проводящий контур выполняет двойную роль: переменный ток в проводнике вызывает появление магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром. А так как магнитный поток изменяется со временем, то появляется ЭДС индукции $\mathscr{E}_{is}$. По правилу Ленца в момент нарастания тока напряженность вихревого электрического поля направлена против тока. Следовательно, в этот момент вихревое поле препятствует нарастанию тока. Наоборот, в момент уменьшения тока вихревое поле поддерживает его.

Явление самоиндукции можно наблюдать в простых опытах. На рисунке 2.13 показана схема параллельного соединения двух одинаковых ламп. Одну из них подключают к источнику через резистор R, а другую — последовательно с катушкой L, снабженной железным сердечником.

При замыкании ключа первая лампа вспыхивает практически сразу, а вторая — с заметным запозданием. ЭДС самоиндукции в цепи этой лампы велика, и сила тока не сразу достигает своего максимального значения (рис. 2.14).

Появление ЭДС самоиндукции при размыкании можно наблюдать в опыте с цепью, схематически показанной на рисунке 2.15. При размыкании ключа в катушке L возникает ЭДС самоиндукции, поддерживающая первоначаль-

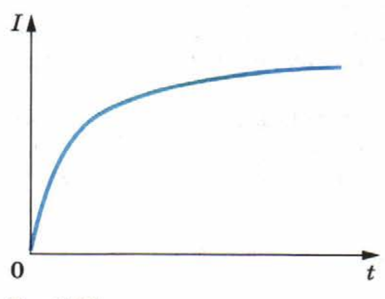


Рис. 2.14

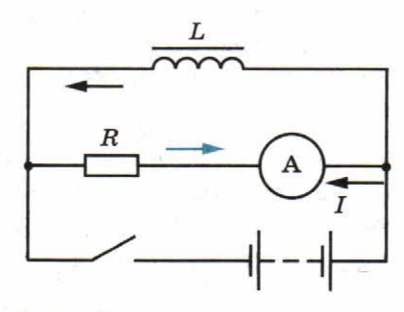


Рис. 2.15

ный ток. В результате в момент размыкания через гальванометр идет ток (цветная стрелка), направленный против начального тока до размыкания (черная стрелка). Сила тока при размыкании цепи может превышать силу тока, проходящего через гальванометр при замкнутом ключе. Это означает, что ЭДС самоиндукции $\mathscr{E}_{is}$ больше ЭДС $\mathscr{E}$ батареи элементов.

Индуктивность. Модуль вектора индукции $\vec{B}$ магнитного поля, создаваемого током, пропорционален силе тока. Так как магнитный поток Ф пропорционален B, то $\Phi \sim B \sim I$.

Можно, следовательно, утверждать, что

$$\Phi = LI, \qquad (2.7)$$

где L — коэффициент пропорциональности между током в проводящем контуре и магнитным потоком. Величину L называют **индуктивностью контура**, или его **коэффициентом самоиндукции.**

Используя закон электромагнитной индукции и выражение (2.7), получаем равенство

$$\boxed{\mathscr{E}_{is} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t},} \qquad (2.8)$$

если считать, что форма контура остается неизменной и поток меняется только за счет изменения силы тока.

Из формулы (2.8) следует, что **индуктивность** — это физическая величина, численно равная ЭДС самоиндукции, возникающей в контуре при изменении силы тока в нем на 1 А за 1 с.

Индуктивность, подобно электроемкости, зависит от геометрических факторов: размеров проводника и его формы, но не зависит непосредственно от силы тока в проводнике. Кроме геометрии проводника, индуктивность зависит от магнитных свойств среды, в которой находится проводник.

Очевидно, что индуктивность одного проволочного витка меньше, чем у катушки (соленоида), состоящей из N таких же витков, так как магнитный поток катушки увеличивается в N раз.

Единицу индуктивности в СИ называют *генри* (обозначается Гн). *Индуктивность проводника равна* 1 Гн, *если в нем при равномерном изменении силы тока на* 1 А *за* 1 с *возникает ЭДС самоиндукции* 1 В:

$$1\ \text{Гн} = \frac{1\ \text{В}}{1\ \frac{\text{А}}{\text{с}}} = 1\ \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{А}}.$$

Аналогия между самоиндукцией и инерцией. Явление самоиндукции подобно явлению инерции в механике. Так, инерция приводит к тому, что под действием силы тело не мгновенно приобретает определенную скорость, а постепенно. Тело нельзя мгновенно затормозить, как бы велика ни была тормозящая сила. Точно так же за счет самоиндукции при замыкании цепи сила тока не сразу приобретает определенное значение, а нарастает постепенно. Выключая источник, мы не прекращаем ток сразу. Самоиндукция поддерживает его некоторое время, несмотря на сопротивление цепи.

Явление самоиндукции выполняет очень важную роль в электротехнике и радиотехнике. Индуктивность цепи оказывает существенное влияние на прохождение по цепи переменного электрического тока. Подробно об этом будет рассказано в главе 4.

При изменении силы тока в проводнике в нем возникает вихревое электрическое поле. Это поле тормозит электроны при возрастании силы тока и ускоряет при убывании.



1. Что называют самоиндукцией?
2. Как направлены по отношению к току линии напряженности вихревого электрического поля в проводнике при увеличении и уменьшении силы тока?
3. Что называют индуктивностью проводника?
4. Что принимают за единицу индуктивности в СИ?
5. Чему равна ЭДС самоиндукции?

§ 16 ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТОКА

Согласно закону сохранения энергии энергия магнитного поля, созданного током, равна той энергии, которую должен затратить источник тока (гальванический элемент, генератор на электростанции и др.) на создание тока. При размыкании цепи эта энергия переходит в другие виды энергии.

То, что для создания тока необходимо затратить энергию, т. е. необходимо совершить работу, объясняется тем, что при замыкании цепи, когда ток начинает нарастать, в проводнике появляется вихревое электрическое поле, действующее против того электрического поля, которое создается в проводнике благодаря источнику тока. Для того чтобы сила тока стала равной I, источник тока должен совершить работу против сил вихревого поля. Эта работа идет на увеличение энергии магнитного поля тока.

При размыкании цепи ток исчезает, и вихревое поле совершает положительную работу. Запасенная током энергия выделяется. Это обнаруживается, например, по мощной искре, возникающей при размыкании цепи с большой индуктивностью.

Энергия магнитного поля, созданного током, проходящим по участку цепи с индуктивностью L, определяется по формуле

$$W_м = \frac{LI^2}{2}. \qquad (2.9)$$

Энергия магнитного поля выражена здесь через характеристику проводника L и силу тока в нем I. Но эту же энергию можно выразить и через характеристики поля. Вычисления показывают, что плотность энергии магнитного поля (т. е. энергия единицы объема) пропорциональна квадрату магнитной индукции: $w_м \sim B^2$, подобно тому как плотность энергии электрического поля пропорциональна квадрату напряженности электрического поля $w_э \sim E^2$.

Магнитное поле, созданное электрическим током, обладает энергией, прямо пропорциональной квадрату силы тока.



1. Почему для создания тока источник должен затратить энергию?
2. Чему равна энергия магнитного поля?

§ 17 ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Изучая свойства электромагнитного поля, Максвелл задался вопросом: если переменное магнитное поле порождает электрическое поле, то не существует ли в природе обратного процесса? Не порождает ли переменное электрическое поле, в свою очередь, магнитное? Это соображение, диктуемое уверенностью в единстве природы, во внутренней стройности и гармонии ее законов, составляет основу гипотезы Максвелла.

Возникновение магнитного поля при изменении электрического поля. Максвелл допустил, что такого рода процесс реально происходит в природе. Во всех случаях, *когда электрическое поле изменяется со временем, оно порождает магнитное поле*. Линии магнитной индукции этого поля охватывают линии напряженности электрического поля (рис. 2.16), подобно тому как линии напряженности электрического поля охватывают линии индукции пере-

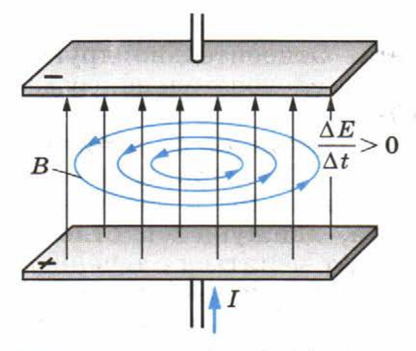


Рис. 2.16

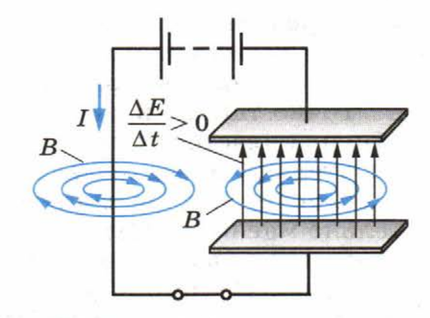


Рис. 2.17

менного магнитного поля. Но теперь при возрастании напряженности электрического поля направление вектора индукции $\vec{B}$ возникающего магнитного поля образует *правый винт* с направлением вектора $\vec{E}$.

При убывании напряженности электрического поля направление вектора магнитной индукции $\vec{B}$ образует с направлением вектора $\vec{E}$ *левый винт*.

Согласно гипотезе Максвелла магнитное поле, например, при зарядке конденсатора после замыкания ключа создается не только током в проводнике, но и изменяющимся электрическим полем, существующим в пространстве между обкладками конденсатора (рис. 2.17). Причем изменяющееся электрическое поле создает такое же магнитное поле, как если бы между обкладками существовал электрический ток, такой же, как в проводнике. Справедливость гипотезы Максвелла была доказана экспериментальным обнаружением электромагнитных волн. Электромагнитные волны существуют потому, что переменное магнитное поле порождает переменное электрическое поле, которое, в свою очередь, порождает переменное магнитное поле и т. д.

Электромагнитное поле. После открытия взаимосвязи между изменяющимися электрическим и магнитным полями стало ясно, что эти поля не существуют обособленно, независимо одно от другого. Нельзя создать переменное магнитное поле без того, чтобы одновременно в пространстве не возникло и электрическое поле. И наоборот, переменное электрическое поле не может существовать без магнитного.

Не менее важно и то, что электрическое поле без магнитного или магнитное без электрического могут существовать лишь по отношению к определенной системе отсчета. Так, покоящийся заряд создает только электрическое

поле (рис. 2.18). Но ведь заряд покоится лишь относительно определенной системы отсчета. Относительно других систем отсчета он может двигаться и, следовательно, создавать и магнитное поле (рис. 2.19).

Точно так же в системе отсчета, связанной с магнитом, обнаруживается лишь магнитное поле. Но движущийся относительно магнита наблюдатель обнаружит и электрическое поле. Ведь в системе отсчета, движущейся относительно магнита, магнитное поле будет меняться с течением времени по мере приближения наблюдателя к магниту или удаления от него. Переменное же во времени магнитное поле порождает вихревое электрическое поле.

Значит, утверждение, что в данной точке пространства существует только электрическое или только магнитное поле, бессмысленно, если не указать, по отношению к какой системе отсчета эти поля рассматриваются. Отсутствие электрического поля в системе отсчета, содержащей покоящийся магнит, совсем не означает, что электрического поля нет вообще. По отношению к любой движущейся относительно магнита системе отсчета это поле может быть обнаружено.

Электрические и магнитные поля — проявление единого целого — *электромагнитного поля*. **Электромагнитное поле** — особая форма материи, осуществляющая электромагнитное взаимодействие. В зависимости от того, в какой системе отсчета рассматриваются электромагнитные процессы, проявляются те или иные стороны единого целого — электромагнитного поля. Все инерциальные системы отсче-

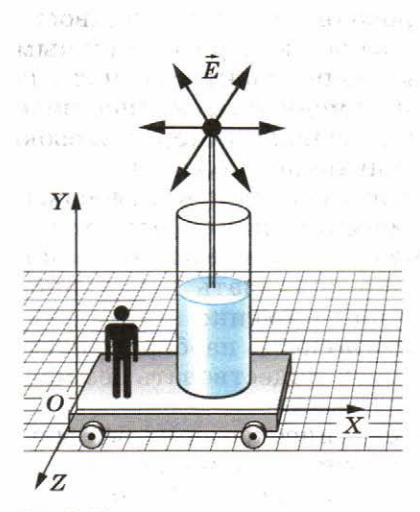


Рис. 2.18

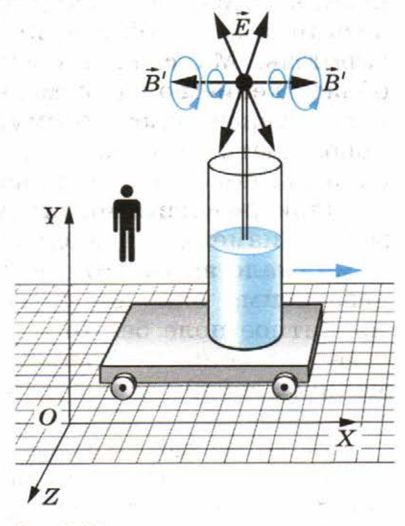


Рис. 2.19

та равноправны. Поэтому ни одному из обнаруживаемых проявлений электромагнитного поля не может быть отдано предпочтение.

Согласно гипотезе Максвелла переменное электрическое поле порождает магнитное поле. Электромагнитное поле — единое целое: в зависимости от системы отсчета проявляются те или иные свойства поля.



1. В результате каких процессов возникает магнитное поле?
2. Почему утверждение о том, что в данной точке пространства существует только электрическое поле или только магнитное поле, не является точным?



ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

1. Прямоугольный контур *ABCD* перемещается поступательно в магнитном поле тока, идущего по прямолинейному длинному проводнику (рис. 2.20). Определите направление тока, индуцированного в контуре, если контур удаляется от провода. Какие силы действуют на контур?

Решение. Вектор магнитной индукции $\vec{B}$ магнитного поля тока I направлен перпендикулярно плоскости контура от нас. При удалении контура от провода магнитный поток через площадку *ABCD* убывает ($\Delta\Phi < 0$). Следовательно, вектор магнитной индукции $\vec{B}'$ магнитного поля тока I_i согласно правилу Ленца направлен от нас, как и вектор $\vec{B}$. Применяя правило буравчика, находим, что индукционный ток в контуре направлен по часовой стрелке.

Взаимодействие тока в контуре с прямолинейным током приводит к появлению сил, действующих на проводники контура. Применив правило левой руки, можно выяснить, что эти силы, во-первых, растягивают рамку, стремясь увеличить площадь контура, и, во-вторых, создают результирующую силу, направленную к прямолинейному проводнику. Оба действия будут препятствовать уменьшению магнитного потока через контур.

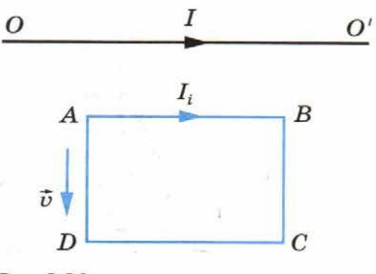


Рис. 2.20

2. Кольцо из сверхпроводника помещено в однородное магнитное поле, индукция которого нарастает от нуля до B_0. Плос-

кость кольца перпендикулярна линиям индукции поля. Определите силу индукционного тока, возникающего в кольце. Радиус кольца r, индуктивность L.

Решение. Так как сопротивление кольца равно нулю, то и суммарная электродвижущая сила в нем должна быть равна нулю. Иначе сила тока согласно закону Ома станет бесконечной. Следовательно, изменение магнитного потока внешнего магнитного поля равно по модулю и противоположно по знаку изменению магнитного потока, созданного индукционным током: $\Delta\Phi = L\Delta I$. Учитывая, что поток Φ_0 нарастает от 0 до $\pi r^2 B_0$, а сила индукционного тока меняется при этом от 0 до I, получаем $\pi r^2 B_0 = LI$. Отсюда $I = \dfrac{\pi r^2 B_0}{L}$.



УПРАЖНЕНИЕ 2

1. Определите направление индукционного тока в сплошном кольце, к которому подносят магнит (см. рис. 2.6).

2. Сила тока в проводнике OO' (см. рис. 2.20) убывает. Определите направление индукционного тока в неподвижном контуре $ABCD$ и направления сил, действующих на каждую из сторон контура.

3. Металлическое кольцо может свободно двигаться по сердечнику катушки, включенной в цепь постоянного тока (рис. 2.21). Что будет происходить в моменты замыкания и размыкания цепи?

4. Магнитный поток через контур проводника сопротивлением $3 \cdot 10^{-2}$ Ом за 2 с изменился на $1{,}2 \cdot 10^{-2}$ Вб. Определите силу тока в проводнике, если изменение потока происходило равномерно.

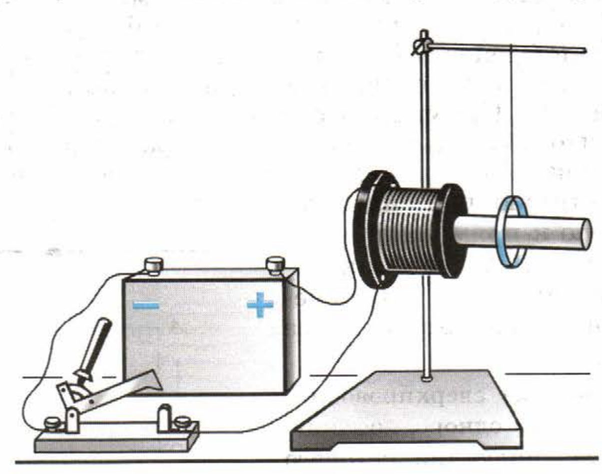


Рис. 2.21

5. Самолет летит горизонтально со скоростью 900 км/ч. Определите разность потенциалов между концами его крыльев, если модуль вертикальной составляющей магнитной индукции земного магнитного поля $5 \cdot 10^{-5}$ Тл, а размах крыльев 12 м.

6. Сила тока в катушке изменяется от 1 А до 4 А за время, равное 3 с. При этом возникает ЭДС самоиндукции, равная 0,1 В. Определите индуктивность катушки и изменение энергии магнитного поля, создаваемого током.

7. В катушке индуктивностью 0,15 Гн и очень малым сопротивлением r сила тока равна 4 А. Параллельно катушке присоединили резистор сопротивлением $R \gg r$. Какое количество теплоты выделится в катушке и в резисторе после быстрого отключения источника тока?

КРАТКИЕ ИТОГИ ГЛАВЫ 2

1. Явление электромагнитной индукции проявляется в возникновении ЭДС индукции в замкнутом контуре при изменении со временем магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром. Это явление лежит в основе работы генераторов всех электростанций. Согласно закону электромагнитной индукции ЭДС индукции в замкнутом контуре равна скорости изменения магнитного потока, взятой со знаком «–»:
$$\mathscr{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$
2. Согласно правилу Ленца возникающий в замкнутом контуре индукционный ток своим магнитным полем противодействует тому изменению магнитного потока, которым он вызван.
3. При возникновении индукционного тока в неподвижном проводнике в роли сторонней силы выступает сила, действующая на заряды со стороны вихревого электрического поля, порождаемого переменным магнитным полем. В движущемся проводнике сторонней силой является магнитная сила Лоренца, действующая на движущиеся вместе с проводником заряженные частицы.
4. Важным частным случаем электромагнитной индукции является самоиндукция. При самоиндукции изменяющееся магнитное поле индуцирует ЭДС в том самом проводнике, по которому идет ток, создающий это поле. ЭДС самоиндукции прямо пропорциональна скорости изменения силы тока в проводнике:
$$\mathscr{E}_{is} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

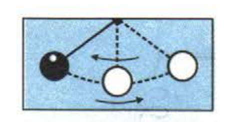
5. Коэффициент пропорциональности L называют индуктивностью. Индуктивность зависит от размеров и формы проводника, а также от свойств среды, в которой находится проводник. Единица индуктивности — генри:

$$1\ \text{Гн} = 1\ \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{А}}.$$

6. Энергия магнитного поля тока равна той работе, которую должен совершить источник, чтобы создать данный ток:

$$W_\text{м} = \frac{LI^2}{2}.$$

7. При анализе явления электромагнитной индукции Максвеллом был сделан вывод о порождении вихревого электрического поля переменным магнитным полем. Он предположил также, что аналогичным образом переменное электрическое поле порождает вихревое магнитное поле.



КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

До сих пор при изучении физики мы придерживались определенной последовательности. При изучении механики рассматривалось механическое движение: изменение положения тел (или их частей) относительно друг друга в пространстве с течением времени. При изучении термодинамики и молекулярной физики мы ознакомились с тепловыми процессами, а затем перешли к изучению электродинамики. Ее изучение мы продолжили и в 11 классе. Еще предстоит ознакомиться с такими важными процессами, как переменный ток, электромагнитные волны (радиоволны) и т. д. Для того чтобы в этих процессах хорошо разобраться, надо вернуться к механике и сначала рассмотреть механические колебания, а затем закончить изучение электродинамики. Для совместного изучения колебаний и волн имеются веские основания.

Казалось бы, что общего между колебаниями маятника и разрядом конденсатора через катушку индуктивности? Однако общее есть. Скоро вы узнаете, что и механические, и электромагнитные колебания подчиняются совершенно *одинаковым количественным законам*. Это обнаруживается, если интересоваться не тем, *что* колеблется (груз на пружине или электрический ток в цепи), а тем, *как* совершаются колебания. Одинаковым количественным законам подчиняются и волновые процессы различной природы.

В современной физике выделился специальный раздел — *физика колебаний*. В нем колебания различной природы рассматриваются с единой точки зрения. Физика колебаний занимается исследованием вибраций машин и механизмов, ее выводы лежат в основе электротехники переменных токов и радиотехники.

Глава 3. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

В этой главе мы рассмотрим особенности механических колебаний и их отличие от других видов механического движения.

§ 18 СВОБОДНЫЕ И ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Колебательные движения, или просто колебания, широко распространены в природе. Заставить предмет колебаться, т. е. совершать повторяющиеся движения, очень просто.

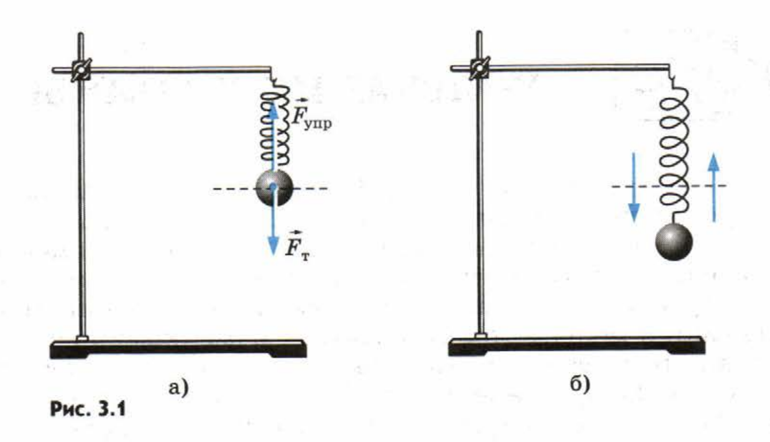


Рис. 3.1

Подвесим пружину к штативу. К нижнему свободному концу пружины прикрепим металлический шарик. Пружина растянется, и сила упругости $\vec{F}_{упр}$ уравновесит силу тяжести $\vec{F}_т$, действующую на шарик (рис. 3.1, *а*). Если теперь вывести шарик из положения равновесия, слегка оттянув его вниз, и отпустить, то он начнет совершать движения — вверх-вниз, вверх-вниз и т. д. (рис. 3.1, *б*). Такого рода движения, при которых тело поочередно смещается то в одну, то в другую сторону, и называются **колебаниями**. С течением времени колебания постепенно ослабевают (затухают), и в конце концов шарик остановится.

Еще проще можно заставить шарик колебаться, если подвесить его на нити. В положении равновесия нить вертикальна и сила тяжести $\vec{F}_т$, действующая на шарик, уравновешивается силой упругости $\vec{F}_{упр}$ нити (рис. 3.2, *а*). Если шарик отклонить и затем отпустить, то он начнет качаться направо-налево, налево-направо (рис. 3.2, *б*) до тех пор, пока колебания не затухнут. Шарик, подвешенный на нити, — это простейший *маятник*[1].

Вообще же обычно **маятником** называют подвешенное на нити или закрепленное на оси тело, которое может совершать колебания под действием силы тяжести. При этом ось не должна проходить через центр тяжести тела. Маятником можно назвать линейку, подвешенную на гвоздь, люстру, коромысло рычажных весов и т. д.

---

[1] Нужно иметь в виду, что шарик, подвешенный на нити, будет представлять собой маятник лишь в том случае, если на него действует сила тяжести Земли. Создающий эту силу земной шар входит в колебательную систему, которую мы для краткости называем просто маятником.

Что же является наиболее характерным признаком колебательного движения? Прежде всего это то, что при колебаниях движения тела *повторяются* или почти повторяются. Так, маятник, совершив один цикл колебаний, т. е. проделав путь от крайнего левого положения до крайнего правого и обратно, вновь совершает такой же цикл. Если движение повторяется точно, то его называют **периодическим**.

Механические колебания — это движения, которые точно или приблизительно повторяются через определенные интервалы времени.

Повторяются движения поршней в двигателе автомобиля, поплавка на волне, ветки дерева на ветру, нашего сердца. Все это различные примеры колебаний.

Свободные колебания. Группу тел, движение которых мы изучаем, называют в механике *системой тел* или просто *системой*. Напомним, что силы, действующие между телами системы, называют *внутренними*. *Внешними силами* называют силы, действующие на тела системы со стороны тел, не входящих в нее.

Самым простым видом колебаний являются свободные колебания. **Свободными колебаниями** называются колебания в системе под действием внутренних сил, после того как система выведена из положения равновесия и предоставлена затем самой себе.

Колебания груза, прикрепленного к пружине, или груза, подвешенного на нити, — это примеры свободных колебаний. После выведения системы из положения равновесия создаются условия, при которых груз колеблется без воздействия внешних сил.

Однако с течением времени колебания затухают, так как на тела системы всегда действуют силы сопротивления. Под действием внутренних сил и сил сопротивления система совершает **затухающие колебания**.

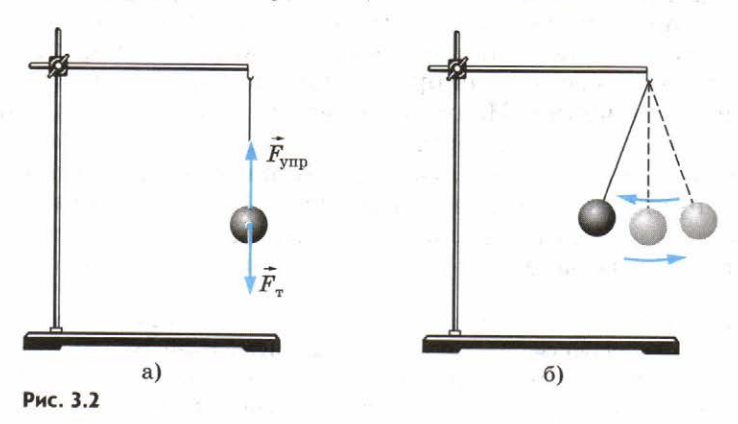


Рис. 3.2

Вынужденные колебания. Для того чтобы колебания не затухали, на тела системы должна действовать периодически изменяющаяся сила. Постоянная сила не может поддерживать колебания, так как под действием этой силы может измениться только положение равновесия, относительно которого происходят колебания.

Вынужденными колебаниями называются колебания тел под действием внешних периодически изменяющихся сил.

Колебания бывают свободными, затухающими и вынужденными. Наибольшее значение имеют вынужденные колебания.

---

§ 19 УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Выясним, какими свойствами должна обладать система для того, чтобы в ней могли возникнуть свободные колебания. Удобнее всего рассмотреть вначале колебания шарика, нанизанного на гладкий горизонтальный стержень под действием силы упругости пружины[1].

Если немного сместить шарик из положения равновесия (рис. 3.3, *а*) вправо, то длина пружины увеличится на x_m (рис. 3.3, *б*), и на шарик начнет действовать сила упругости со стороны пружины. Эта сила согласно закону Гука пропорциональна деформации пружины и направлена влево. Если отпустить шарик, то под действием силы упругости он начнет двигаться с ускорением влево, увеличивая свою скорость. Сила упругости при этом будет убывать, так как деформация пружины уменьшается. В момент, когда шарик достигнет положения равновесия, сила упругости пружины станет равной нулю. Следовательно, согласно второму закону Ньютона станет равным нулю и ускорение шарика.

К этому моменту скорость шарика достигнет максимального значения. Не останавливаясь в положении равновесия, он будет по инерции продолжать двигаться влево. Пружина при этом сжимается. В результате появляется сила упругости, направленная уже вправо и тормозящая движение шарика (рис. 3.3, *в*). Эта сила, а значит, и направленное вправо ускорение увеличиваются по модулю

---

[1] Анализ колебаний шарика, подвешенного на вертикальной пружине, несколько сложнее. В этом случае действуют одновременно переменная сила упругости пружины и постоянная сила тяжести. Но характер колебаний в том и другом случаях совершенно одинаков.

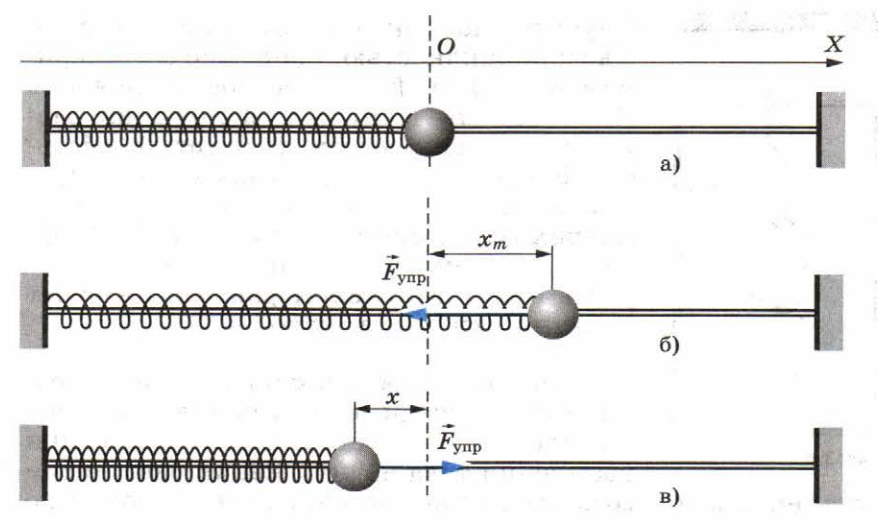
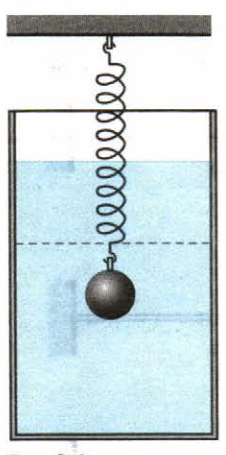


Рис. 3.3

прямо пропорционально модулю смещения x шарика относительно положения равновесия. Скорость же будет уменьшаться до тех пор, пока в крайнем левом положении шарика не обратится в нуль. После этого шарик начнет ускоренно двигаться вправо. С уменьшением модуля смещения x сила $F_{упр}$ убывает по модулю и в положении равновесия опять обращается в нуль. Но шарик уже успевает к этому моменту приобрести скорость и, следовательно, по инерции продолжает двигаться вправо. Это движение приводит к растяжению пружины и появлению силы, направленной влево. Движение шарика тормозится до полной остановки в крайнем правом положении, после чего весь процесс повторяется сначала.

Если бы не существовало трения, то движение шарика не прекратилось бы никогда. Однако трение и сопротивление воздуха препятствуют движению шарика. Направление силы сопротивления как при движении шарика вправо, так и при его движении влево все время противоположно направлению скорости. Размах его колебаний постепенно будет уменьшаться до тех пор, пока движение не прекратится. При малом трении затухание становится заметным лишь после того, как шарик совершит много колебаний. Если наблюдать движение шарика на протяжении не очень большого интервала времени, то затуханием колебаний можно пренебречь. В этом случае влияние силы сопротивления на движение можно не учитывать.

Если сила сопротивления велика, то пренебречь ее действием даже в течение малых интервалов времени нельзя.


Рис. 3.4

Опустите шарик на пружине в стакан с вязкой жидкостью, например с глицерином (рис. 3.4). Если жесткость пружины мала, то выведенный из положения равновесия шарик совсем не будет колебаться. Под действием силы упругости он просто вернется в положение равновесия (штриховая линия на рисунке 3.4). За счет действия силы сопротивления скорость его в положении равновесия будет практически равна нулю.

Для того, чтобы в системе могли возникнуть свободные колебания, должны выполняться два условия. *Во-первых*, при выведении тела из положения равновесия в системе должна возникать сила, направленная к положению равновесия и, следовательно, стремящаяся возвратить тело в положение равновесия. Именно так действует в рассмотренной нами системе (см. рис. 3.3) пружина: при перемещении шарика и влево, и вправо сила упругости направлена к положению равновесия. *Во-вторых*, трение в системе должно быть достаточно мало. Иначе колебания быстро затухнут. Незатухающие колебания возможны лишь при отсутствии трения.



1. **Какие колебания называют свободными?**
2. **При каких условиях в системе возникают свободные колебания?**
3. **Какие колебания называют вынужденными? Приведите примеры вынужденных колебаний.**

§ 20 МАТЕМАТИЧЕСКИЙ МАЯТНИК

Математический маятник — это материальная точка, подвешенная на длинной невесомой и нерастяжимой нити. *Математический маятник* — модель обычного (реального) маятника, представляющего собой небольшое тело, подвешенное на длинной нити.

Выведем тело маятника (шарик) из положения равновесия и отпустим. На шарик будут действовать две силы: сила тяжести $\vec{F}_т = m\vec{g}$, направленная вертикально вниз, и сила упругости нити $\vec{F}_{упр}$, направленная вдоль нити (рис. 3.5). Конечно, при движении маятника на него еще действует сила сопротивления. Но мы будем считать ее пренебрежимо малой.

Для того чтобы отчетливо представить себе динамику движения маятника, удобно силу тяжести разложить на две

составляющие: $\vec{F}_n$, направленную вдоль нити, и $\vec{F}_\tau$, направленную перпендикулярно нити по касательной к траектории шарика. Силы $\vec{F}_n$ и $\vec{F}_\tau$ в сумме составляют силу $\vec{F}_т$. Сила упругости нити $\vec{F}_{упр}$ и составляющая силы тяжести $\vec{F}_n$ перпендикулярны скорости маятника и сообщают ему центростремительное ускорение. Это ускорение направлено к центру дуги окружности — траектории движения маятника. Работа этих сил равна нулю. Поэтому, согласно теореме о кинетической энергии, они не меняют скорость маятника по модулю. Их действие приводит лишь к тому, что вектор скорости непрерывно меняет направление, так что в любой момент времени скорость шарика направлена по касательной к дуге окружности. Под действием составляющей $\vec{F}_\tau$ силы тяжести маятник начинает двигаться по дуге окружности вниз с нарастающей по модулю скоростью. При движении маятника эта составляющая силы тяжести, направленная к положению равновесия, уменьшается по модулю, и в момент, когда маятник проходит через положение равновесия, она становится равной нулю. Вследствие своей инертности маятник продолжает движение, поднимаясь вверх. При этом $\vec{F}_\tau$ уже будет направлена против скорости. Поэтому модуль скорости маятника станет уменьшаться. В момент остановки маятника в верхней точке его траектории модуль $\vec{F}_\tau$ максимален и она будет вызывать движение маятника в сторону положения равновесия. Далее скорость маятника увеличивается по модулю, и он снова движется к положению равновесия. Пройдя положение равновесия, он возвращается в исходное положение, если только сила сопротивления мала и ее работой в течение небольшого интервала времени можно пренебречь. Опустив маятник в сосуд с вязкой жидкостью, мы тут же обнаружим, что колебания не происходят совсем или затухают очень быстро.

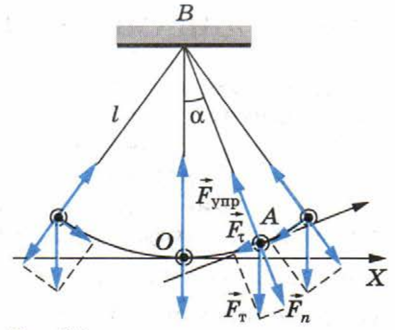


Рис. 3.5

Математический маятник свободно колеблется при двух условиях: 1) при выведении его из положения равновесия в системе возникает сила, направленная к положению равновесия; 2) трение в колебательной системе достаточно мало.

§ 21 ДИНАМИКА КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Для того чтобы описать количественно колебания тела под действием силы упругости пружины или колебания шарика, подвешенного на нити, воспользуемся законами механики Ньютона.

Уравнение движения тела, колеблющегося под действием силы упругости. Согласно второму закону Ньютона произведение массы тела m на ускорение его $\vec{a}$ равно равнодействующей $\vec{F}$ всех сил, приложенных к телу:

$$m\vec{a} = \vec{F}. \quad (3.1)$$

Это — уравнение движения. Запишем уравнение движения для шарика, движущегося прямолинейно вдоль горизонтали под действием силы упругости $\vec{F}$ пружины (см. рис. 3.3). Направим ось OX вправо. Пусть начало отсчета координат соответствует положению равновесия шарика (см. рис. 3.3, *а*).

В проекции на ось OX уравнение движения (3.1) можно записать так: $ma_x = F_{x\ упр}$, где a_x и $F_{x\ упр}$ соответственно проекции ускорения и силы упругости пружины на эту ось.

Согласно закону Гука проекция $F_{x\ упр}$ прямо пропорциональна смещению шарика из положения равновесия. Смещение же равно координате x шарика, причем проекция силы и координата имеют противоположные знаки (см. рис. 3.3, *б*, *в*). Следовательно,

$$F_{x\ упр} = -kx, \quad (3.2)$$

где k — жесткость пружины.

Уравнение движения шарика тогда примет вид

$$ma_x = -kx. \quad (3.3)$$

Разделив левую и правую части уравнения (3.3) на m, получим

$$a_x = -\frac{k}{m}x. \quad (3.4)$$

Так как масса m и жесткость k — постоянные величины, то их отношение $\frac{k}{m}$ также постоянная величина.

Мы получили уравнение, описывающее колебания тела под действием силы упругости. Оно очень простое: *проекция a_x ускорения тела прямо пропорциональна его координате x, взятой с противоположным знаком.*

Уравнение движения математического маятника. При колебаниях шарика на нерастяжимой нити он все время движется по дуге окружности, радиус которой равен длине

нити l. Поэтому положение шарика в любой момент времени определяется одной величиной — углом α отклонения нити от вертикали. Будем считать угол α положительным, если маятник отклонен вправо от положения равновесия, и отрицательным, если он отклонен влево (см. рис. 3.5). Касательную к траектории будем считать направленной в сторону положительного отсчета углов.

Обозначим проекцию силы тяжести на касательную к траектории маятника через F_τ. Эта проекция в момент, когда нить маятника отклонена от положения равновесия на угол α, равна:

$$F_\tau = -mg\sin\alpha. \qquad (3.5)$$

Знак «–» здесь стоит потому, что величины F_τ и α имеют противоположные знаки. При отклонении маятника вправо ($\alpha > 0$) составляющая силы тяжести $\vec{F}_\tau$ направлена влево и ее проекция отрицательна: $F_\tau < 0$. При отклонении маятника влево ($\alpha < 0$) эта проекция положительна: $F_\tau > 0$.

Обозначим проекцию ускорения маятника на касательную к его траектории через a_τ. Эта проекция характеризует быстроту изменения модуля скорости маятника.

Согласно второму закону Ньютона

$$ma_\tau = F_\tau,$$

или

$$ma_\tau = -mg\sin\alpha. \qquad (3.6)$$

Разделив левую и правую части этого уравнения на m, получим

$$a_\tau = -g\sin\alpha. \qquad (3.7)$$

Ранее предполагалось, что углы отклонения нити маятника от вертикали могут быть любыми. В дальнейшем будем считать их малыми. При малых углах, если угол измерен в радианах,

$$\sin\alpha \approx \alpha.$$

Следовательно, можно принять

$$a_\tau = -g\alpha. \qquad (3.8)$$

Если угол α мал, то проекция ускорения примерно равна проекции ускорения на ось OX: $a_\tau \approx a_x$ (см. рис. 3.5). Из треугольника ABO для малого угла α имеем:

$$\alpha = \frac{x}{l}. \qquad (3.9)$$

Подставив это выражение в равенство (3.8) вместо угла α, получим

$$a_\tau = -\frac{g}{l}x. \tag{3.10}$$

Это уравнение имеет такой же вид, что и уравнение (3.4) для ускорения шарика, прикрепленного к пружине. Следовательно, и решение этого уравнения будет иметь тот же вид, что и решение уравнения (3.4). Это означает, что движение шарика и колебания маятника происходят одинаковым образом. Смещения шарика на пружине и тела маятника от положений равновесия изменяются со временем по одному и тому же закону, несмотря на то, что силы, вызывающие колебания, имеют различную физическую природу. Умножив уравнения (3.4) и (3.10) на m и вспомнив второй закон Ньютона $ma_x = F_{x\,рез}$, можно сделать вывод, что колебания в этих двух случаях совершаются под действием сил, равнодействующая которых прямо пропорциональна смещению колеблющегося тела от положения равновесия и направлена в сторону, противоположную этому смещению.

Уравнение (3.4), как и (3.10), на вид очень простое: ускорение прямо пропорционально координате (смещению от положения равновесия).

§ 22 ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

Зная, как связаны между собой ускорение и координата колеблющегося тела, можно на основе математического анализа найти зависимость координаты от времени.

Ускорение — вторая производная координаты по времени. Мгновенная скорость точки, как вам известно из курса математики, представляет собой производную координаты точки по времени. Ускорение точки — это производная ее скорости по времени, или вторая производная координаты по времени. Поэтому уравнение (3.4) можно записать так:

$$x'' = -\frac{k}{m}x, \tag{3.11}$$

где x'' — вторая производная координаты по времени. Согласно уравнению (3.11) при свободных колебаниях координата x изменяется со временем так, что вторая производная координаты по времени прямо пропорциональна самой координате и противоположна ей по знаку.

Гармонические колебания. Из курса математики известно, что вторые производные синуса и косинуса по их аргу-

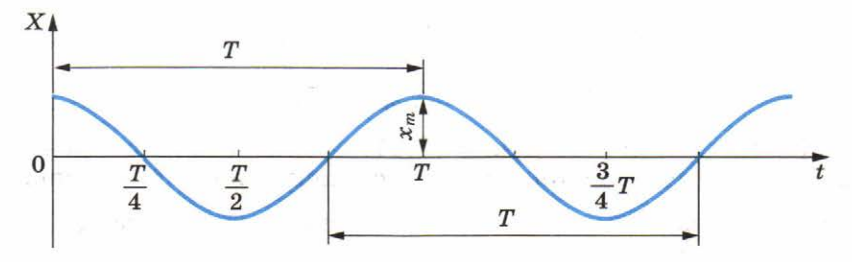


Рис. 3.6

менту пропорциональны самим функциям, взятым с противоположным знаком. В математическом анализе доказывается, что никакие другие функции таким свойством не обладают. Все это позволяет с полным основанием утверждать, что *координата тела, совершающего свободные колебания, меняется с течением времени по закону синуса или косинуса*. На рисунке 3.6 показано изменение координаты точки со временем по закону косинуса.

Периодические изменения физической величины в зависимости от времени, происходящие по закону синуса или косинуса, называются **гармоническими колебаниями.**

Вначале мы будем рассматривать гармонические изменения координаты. В дальнейшем ознакомимся с гармоническими изменениями других величин.

Амплитуда колебаний. Амплитудой гармонических колебаний называется модуль наибольшего смещения тела от положения равновесия.

Амплитуда может иметь различные значения в зависимости от того, насколько мы смещаем тело от положения равновесия в начальный момент времени, или от того, какая скорость сообщается телу. Амплитуда определяется начальными условиями, а точнее энергией, сообщаемой телу. Но максимальные значения модуля синуса и модуля косинуса равны единице. Поэтому решение уравнения (3.11) не может выражаться просто синусом или косинусом. Оно должно иметь вид произведения амплитуды колебаний x_m на синус или косинус.

Решение уравнения, описывающего свободные колебания. Запишем решение уравнения (3.11) в следующем виде:

$$x = x_m \cos\sqrt{\frac{k}{m}}\,t. \tag{3.12}$$

В этом случае первая производная принимает вид

$$x' = -\sqrt{\frac{k}{m}}\,x_m \sin\sqrt{\frac{k}{m}}\,t,$$

а вторая производная будет равна:

$$x'' = -\frac{k}{m}x_m \cos\sqrt{\frac{k}{m}}\,t = -\frac{k}{m}x.$$

Мы получили уравнение (3.11). Следовательно, функция (3.12) есть решение исходного уравнения (3.11). Решением этого уравнения будет также функция $x = x_m \sin\sqrt{\frac{k}{m}}\,t$.

Обозначим постоянную величину $\sqrt{\frac{k}{m}}$, зависящую от свойств системы, через ω_0:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}. \qquad (3.13)$$

Тогда решение уравнения (3.11) можно записать так:

$$x = x_m \cos \omega_0 t. \qquad (3.14)$$

Само же уравнение (3.11) принимает вид

$$x'' = -\omega_0^2 x. \qquad (3.15)$$

График зависимости координаты тела от времени согласно (3.14) представляет собой косинусоиду (см. рис. 3.6).

Период и частота гармонических колебаний. При колебаниях движения тела периодически повторяются. Промежуток времени T, за который система совершает один полный цикл колебаний, называется **периодом колебаний.**

Зная период, можно определить **частоту колебаний**, т. е. число колебаний в единицу времени, например за секунду. Если одно колебание совершается за время T, то число колебаний за секунду

$$\nu = \frac{1}{T}. \qquad (3.16)$$

В Международной системе единиц (СИ) *частота колебаний равна единице, если за секунду совершается одно колебание*. Единица частоты называется *герцем* (сокращенно: Гц) в честь немецкого физика Г. Герца.

Число колебаний за 2π с равно:

$$\omega_0 = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}. \qquad (3.17)$$

Величина ω_0 — **циклическая**, или **круговая, частота** колебаний. Если в уравнении (3.14) время t равно одному периоду, то $\omega_0 T = 2\pi$. Таким образом, если в момент времени $t = 0$ $x = x_m$, то и в момент времени $t = T$ $x = x_m$, т. е. через промежуток времени, равный одному периоду, колебания повторяются.

Частоту свободных колебаний называют **собственной частотой колебательной системы**[1].

Зависимость частоты и периода свободных колебаний от свойств системы. Собственная частота колебаний тела, прикрепленного к пружине, согласно уравнению (3.13) равна:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

Она тем больше, чем больше жесткость пружины k, и тем меньше, чем больше масса тела m. Это легко понять: жесткая пружина сообщает телу большее ускорение, быстрее меняет скорость тела. А чем тело массивнее, тем медленнее оно изменяет скорость под влиянием силы. Период колебаний равен:

$$\boxed{T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}.} \qquad (3.18)$$

Располагая набором пружин различной жесткости и телами различной массы, нетрудно убедиться на опыте, что формулы (3.13) и (3.18) правильно описывают характер зависимости ω_0 и T от k и m.

Замечательно, что период колебаний тела на пружине и период колебаний маятника при малых углах отклонения не зависят от амплитуды колебаний.

Модуль коэффициента пропорциональности между ускорением a_τ и смещением x в уравнении (3.10), описывающем колебания маятника, представляет собой, как и в уравнении (3.11), квадрат циклической частоты. Следовательно, собственная частота колебаний математического маятника при малых углах отклонения нити от вертикали зависит от длины маятника и ускорения свободного падения:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}. \qquad (3.19)$$

Период же этих колебаний равен:

$$\boxed{T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}.} \qquad (3.20)$$

Эта формула была впервые получена и проверена на опыте голландским ученым Г. Гюйгенсом — современником И. Ньютона. Она справедлива только для малых углов отклонения нити.

---

[1] Часто в дальнейшем для краткости мы будем называть циклическую частоту просто частотой. Отличить циклическую частоту от обычной частоты можно по обозначениям.

Период колебаний возрастает с увеличением длины маятника. От массы маятника он не зависит. Это легко проверить на опыте с различными маятниками. Зависимость периода колебаний от ускорения свободного падения также можно обнаружить. Чем меньше g, тем больше период колебаний маятника и, следовательно, тем медленнее идут часы с маятником. Так, часы с маятником в виде груза на стержне отстанут за сутки почти на 3 с, если их поднять из подвала на верхний этаж Московского университета (высота 200 м). И это только за счет уменьшения ускорения свободного падения с высотой.

Зависимость периода колебаний маятника от значения g используется на практике. Измеряя период колебаний, можно очень точно определить g. Ускорение свободного падения меняется с географической широтой. Но и на данной широте оно не везде одинаково. Ведь плотность земной коры не всюду одинакова. В районах, где залегают плотные породы, ускорение g несколько большее. Это учитывают при поисках полезных ископаемых.

Так, железная руда обладает повышенной плотностью по сравнению с обычными породами. Проведенные под руководством академика А. А. Михайлова измерения ускорения свободного падения под Курском позволили уточнить места залегания железной руды. Сначала они были обнаружены посредством магнитных измерений.

Свойства механических колебаний используются в устройствах большинства электронных весов. Взвешиваемое тело кладут на платформу, под которой установлена жесткая пружина. В результате возникают механические колебания, частота которых измеряется соответствующим датчиком. Микропроцессор, связанный с этим датчиком, переводит частоту колебаний в массу взвешиваемого тела, так как эта частота зависит от массы.

Полученные формулы (3.18) и (3.20) для периода колебаний свидетельствуют о том, что период гармонических колебаний зависит от параметров системы (жесткости пружины, длины нити и т. д.)

§ 23 ФАЗА КОЛЕБАНИЙ

Введем еще одну величину, характеризующую гармонические колебания, — *фазу колебаний.*

При заданной амплитуде колебаний координата колеблющегося тела в любой момент времени однозначно определяется аргументом косинуса или синуса: $\varphi = \omega_0 t$.

Величину φ, стоящую под знаком функции косинуса или синуса, называют **фазой колебаний**, описываемой этой функцией. Выражается фаза в угловых единицах — радианах.

Фаза определяет не только значение координаты, но и значение других физических величин, например скорости и ускорения, изменяющихся также по гармоническому закону. Поэтому можно сказать, что *фаза определяет при заданной амплитуде состояние колебательной системы в любой момент времени*. В этом состоит значение понятия фазы.

Колебания с одинаковыми амплитудами и частотами могут различаться фазами.

Так как $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$, то

$$\varphi = \omega_0 t = 2\pi \frac{t}{T}. \qquad (3.21)$$

Отношение $\frac{t}{T}$ указывает, сколько периодов прошло от момента начала колебаний. Любому значению времени t, выраженному в числе периодов T, соответствует значение фазы φ, выраженное в радианах. Так, по прошествии времени $t = \frac{T}{4}$ (четверти периода) $\varphi = \frac{\pi}{2}$, по прошествии половины периода $\varphi = \pi$, по прошествии целого периода $\varphi = 2\pi$ и т. д.

Можно изобразить на графике зависимость координаты колеблющейся точки не от времени, а от фазы. На рисунке 3.7 показана та же косинусоида, что и на рисунке 3.6, но на горизонтальной оси отложены вместо времени различные значения фазы φ.

Представление гармонических колебаний с помощью косинуса и синуса. Вы уже знаете, что при гармонических колебаниях координата тела изменяется со временем по закону косинуса или синуса. После введения понятия фазы остановимся на этом подробнее.

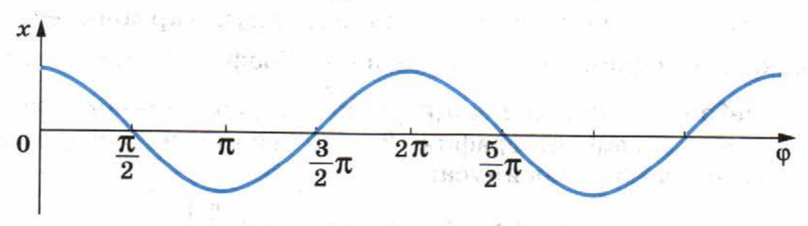


Рис. 3.7

Синус отличается от косинуса сдвигом аргумента на $\frac{\pi}{2}$, что соответствует, как видно из уравнения (3.21), промежутку времени, равному четверти периода:

$$\cos\varphi = \sin\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right). \quad (3.22)$$

Поэтому вместо формулы $x = x_m \cos\omega_0 t$ можно для описания гармонических колебаний использовать формулу

$$x = x_m \sin\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2}\right). \quad (3.23)$$

Но при этом *начальная фаза*, т. е. значение фазы в момент времени $t = 0$, равна не нулю, а $\frac{\pi}{2}$.

Обычно колебания тела, прикрепленного к пружине, или колебания маятника мы возбуждаем, выводя тело маятника из положения равновесия и затем отпуская его. Смещение от положения равновесия максимально в начальной момент. Поэтому для описания колебаний удобнее пользоваться формулой (3.14) с применением косинуса, чем формулой (3.23) с применением синуса.

Но если бы мы возбудили колебания покоящегося тела кратковременным толчком, то координата тела в начальный момент была бы равна нулю, и изменения координаты со временем было бы удобнее описывать с помощью синуса, т. е. формулой

$$x = x_m \sin\omega_0 t, \quad (3.24)$$

так как при этом начальная фаза равна нулю.

Если в начальный момент времени (при $t = 0$) фаза колебаний равна φ, то уравнение колебаний можно записать в виде

$$x = x_m \sin(\omega_0 t + \varphi).$$

Сдвиг фаз. Колебания, описываемые формулами (3.23) и (3.24), отличаются друг от друга только фазами. *Разность фаз*, или, как часто говорят, *сдвиг фаз*, этих колебаний составляет $\frac{\pi}{2}$. На рисунке 3.8 показаны графики зависимости координат от времени для двух гармонических колебаний, сдвинутых по фазе на $\frac{\pi}{2}$. График *1* соответствует колебаниям, совершающимся по синусоидальному закону: $x = x_m \sin\omega_0 t$, а график *2* — колебаниям, совершающимся по закону косинуса:

$$x = x_m \cos\omega_0 t = x_m \sin\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2}\right).$$

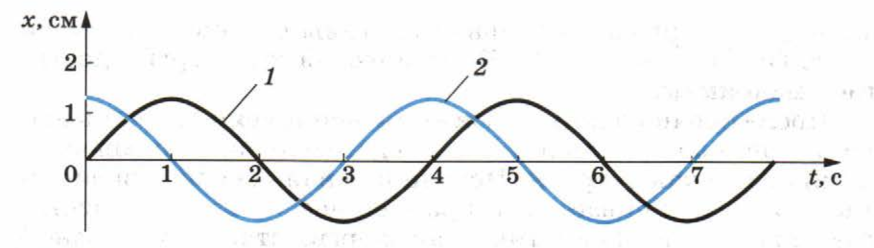


Рис. 3.8

Для определения разности фаз двух колебаний надо в обоих случаях колеблющуюся величину выразить через одну и ту же тригонометрическую функцию — косинус или синус.



1. Какие колебания называют гармоническими?

2. Как связаны ускорение и координата при гармонических колебаниях?

3. Как связаны циклическая частота колебаний и период колебаний?

4. Почему частота колебаний тела, прикрепленного к пружине, зависит от его массы, а частота колебаний математического маятника от массы не зависит?

5. Каковы амплитуды и периоды трех различных гармонических колебаний, графики которых представлены на рисунках 3.8, 3.9?

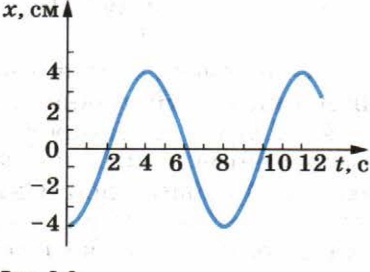


Рис. 3.9

§ 24 ПРЕВРАЩЕНИЕ ЭНЕРГИИ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЯХ

Рассмотрим превращение энергии при гармонических колебаниях в двух случаях: в системе нет трения; в системе есть трение.

Превращения энергии в системах без трения. Смещая шарик, прикрепленный к пружине (см. рис. 3.3), вправо на расстояние x_m, мы сообщаем колебательной системе потенциальную энергию:

$$W_п = \frac{kx_m^2}{2}.$$

При движении шарика влево деформация пружины становится меньше, и потенциальная энергия системы уменьшается. Но одновременно увеличивается скорость и, следовательно, возрастает кинетическая энергия. В момент прохождения шариком положения равновесия потенци-

альная энергия колебательной системы становится равной нулю ($W_п = 0$ при $x = 0$). Кинетическая же энергия достигает максимума.

После прохождения положения равновесия скорость шарика начинает уменьшаться. Следовательно, уменьшается и кинетическая энергия. Потенциальная же энергия системы снова увеличивается. В крайней левой точке она достигает максимума, а кинетическая энергия становится равной нулю. Таким образом, при колебаниях периодически происходит переход потенциальной энергии в кинетическую и обратно. Нетрудно проследить за тем, что такие же превращения механической энергии из одного ее вида в другой происходят и в случае математического маятника.

Полная механическая энергия при колебаниях тела, прикрепленного к пружине, равна сумме кинетической и потенциальной энергий колебательной системы:

$$W = W_к + W_п = \frac{mv_x^2}{2} + \frac{kx^2}{2}. \qquad (3.25)$$

Кинетическая и потенциальная энергии периодически изменяются. Но полная механическая энергия изолированной системы, в которой отсутствуют силы сопротивления, сохраняется (согласно закону сохранения механической энергии) неизменной. Она равна либо потенциальной энергии в момент максимального отклонения от положения равновесия, либо же кинетической энергии в момент, когда тело проходит положение равновесия:

$$W = \frac{kx_m^2}{2} = \frac{mv_m^2}{2}. \qquad (3.26)$$

Энергия колеблющегося тела прямо пропорциональна квадрату амплитуды колебаний координаты или квадрату амплитуды колебаний скорости (см. формулу (3.26)).

Затухающие колебания. Свободные колебания груза, прикрепленного к пружине, или маятника являются гармоническими лишь в том случае, когда нет трения. Но силы трения, или, точнее, силы сопротивления окружающей среды, хотя, может быть, и малые, всегда действуют на колеблющееся тело.

Силы сопротивления совершают отрицательную работу и тем самым уменьшают механическую энергию системы. Поэтому с течением времени максимальные отклонения тела от положения равновесия становятся все меньше и меньше. В конце концов, после того как запас механической энергии окажется исчерпанным, колебания прекратятся совсем. Колебания при наличии сил сопротивления являются *затухающими*.

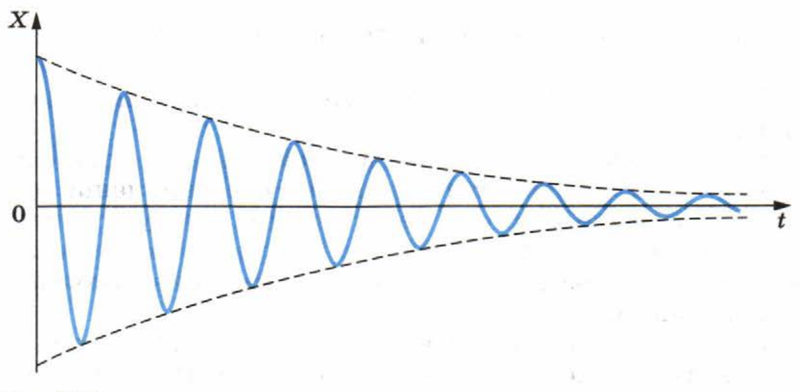


Рис. 3.10

График зависимости координаты тела от времени при затухающих колебаниях изображен на рисунке 3.10. Подобный график может вычертить само колеблющееся тело, например маятник.

На рисунке 3.11 изображен маятник с песочницей. Маятник на равномерно движущемся под ним листе картона струйкой песка вычерчивает график зависимости своей координаты от времени. Это простой метод временной развертки колебаний, дающий достаточно полное представление о процессе колебательного движения. При небольшом сопротивлении затухание колебаний на протяжении нескольких периодов мало. Если же к нитям подвеса прикрепить лист плотной бумаги для увеличения силы сопротивления, то затухание станет значительным.

В автомобилях применяются специальные амортизаторы для гашения колебаний кузова при езде по неровной дороге. При колебаниях кузова связанный с ним поршень движется в цилиндре, заполненном жидкостью. Жидкость перетекает через отверстия в поршне, что приводит к появлению больших сил сопротивления и быстрому затуханию колебаний.

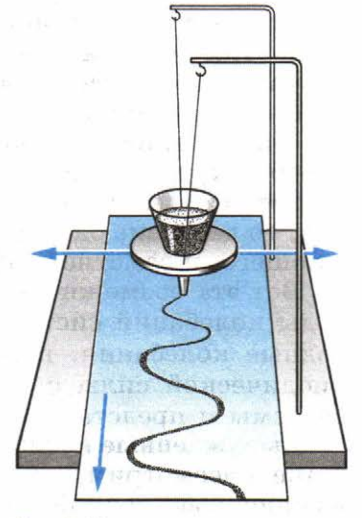


Рис. 3.11

Энергия колеблющегося тела при отсутствии сил трения сохраняется неизменной.

Если на тела системы действуют силы сопротивления, то колебания являются затухающими.

§ 25 ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ. РЕЗОНАНС

Как нам известно, свободные колебания затухают за определенное время.

Но наиболее важное значение имеют незатухающие колебания, — те, которые могут длиться неограниченно долго.

Самый простой способ возбуждения незатухающих колебаний состоит в том, что на систему воздействуют внешней периодической силой. Такие колебания называются **вынужденными.**

Работа внешней силы над системой обеспечивает приток энергии к системе извне. Приток энергии не дает колебаниям затухнуть, несмотря на действие сил трения.

Особый интерес представляют вынужденные колебания в системе, способной совершать почти свободные колебания. С этим случаем знакомы все, кому приходилось раскачивать ребенка на качелях.

Качели — это маятник, т. е. колебательная система с определенной собственной частотой. Отклонить качели на больший угол от положения равновесия с помощью постоянной во времени небольшой силы невозможно. Не удается раскачать качели и в том случае, если их беспорядочно подталкивать в разные стороны. Однако, если начать в правильном ритме подталкивать качели вперед каждый раз, когда они поравняются с нами, то можно и без большого напряжения раскачать их очень сильно. Правда, для этого потребуется некоторое время. Каждый толчок сам по себе может быть незначительным. После первого толчка качели будут совершать лишь очень малые колебания. Но если темп этих колебаний и внешних толчков один и тот же, то второй толчок будет своевременным и усилит действие первого. Третий усилит колебания еще больше и т. д. Произойдет накопление результатов действия отдельных толчков, и амплитуда колебаний качелей станет большой. Между тем если отдельные толчки следуют друг за другом невпопад, то действие одного будет уничтожаться действием следующего, и заметного эффекта не будет.

Вот эта возможность значительного увеличения амплитуды колебаний системы, способной совершать почти свободные колебания, при совпадении частоты внешней периодической силы с собственной частотой колебательной системы и представляет особый интерес.

Вынужденные колебания шарика, прикрепленного к пружине. Рассмотрим вынужденные колебания в системе, обладающей собственной частотой колебаний. Вместо маятника удобнее взять шарик, прикрепленный к пружине. Пусть ко-

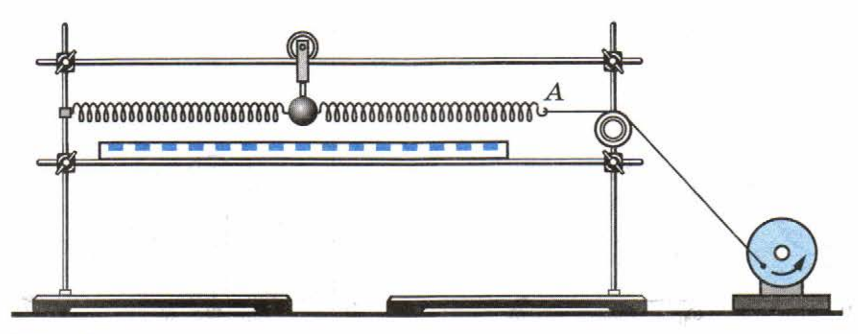


Рис. 3.12

нец одной из пружин будет прикреплен к нити, перекинутой через блок (рис. 3.12), а нить соединена со стерженьком на диске. Если вращать диск с помощью электродвигателя, то на шарик начнет действовать периодическая внешняя сила.

Постепенно шарик начнет раскачиваться. При этом амплитуда колебаний будет нарастать. Спустя некоторое время колебания приобретут *установившийся* характер: их амплитуда перестанет изменяться со временем. Причем можно обнаружить, что частота колебаний шарика[1] равна частоте колебаний конца A пружины, т. е. частоте изменения внешней силы. (Эта частота равна числу оборотов диска в секунду.)

При установившихся вынужденных колебаниях частота колебаний всегда равна частоте внешней периодически действующей силы.

Резонанс. Пользуясь установкой, изображенной на рисунке 3.12, выясним, как амплитуда установившихся вынужденных колебаний зависит от частоты внешней силы. Плавно увеличивая частоту внешней силы, мы заметим, что амплитуда колебаний постепенно возрастает. Она достигает максимума, когда внешняя сила действует в такт со свободными колебаниями шарика.

При дальнейшем увеличении частоты амплитуда установившихся колебаний уменьшается. Зависимость амплитуды колебаний от частоты изображена на рисунке 3.13. При очень больших частотах внешней силы амплитуда вынужденных колебаний стремится к нулю с ростом частоты, так как тело, вследствие своей инертности, не успевает заметно смещаться за малые промежутки времени и «дрожит на месте».

Резкое возрастание амплитуды вынужденных колебаний при совпадении частоты изменения внешней силы,

[1] Частоту вынужденных колебаний будем обозначать буквой ω в отличие от частоты собственных колебаний системы ω_0.

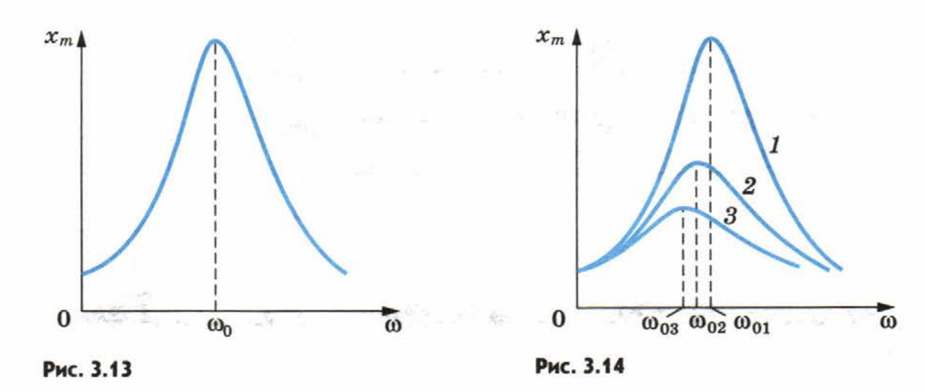


Рис. 3.13 **Рис. 3.14**

действующей на систему, с частотой ее свободных колебаний называется **резонансом** (от латинского слова resonans — дающий отзвук).

Почему возникает резонанс? Объяснить это явление можно с энергетических позиций.

При резонансе амплитуда вынужденных колебаний максимальна из-за того, что создаются наиболее благоприятные условия для передачи энергии от внешнего источника периодической силы к системе. Внешняя сила при резонансе действует в такт со свободными колебаниями. На протяжении всего периода ее направление совпадает с направлением скорости колеблющегося тела. Поэтому на протяжении всего периода эта сила совершает только положительную работу. При установившихся колебаниях положительная работа внешней силы равна по модулю отрицательной работе силы сопротивления.

Если частота внешней силы не равна собственной частоте ω_0 колебаний системы, то внешняя сила лишь в течение части периода совершает положительную работу. В течение же другой части периода направление силы противоположно направлению скорости, и работа внешней силы будет отрицательной. В целом работа внешней силы за период невелика и соответственно невелика и амплитуда установившихся колебаний. Существенное влияние на резонанс оказывает трение в системе. При резонансе положительная работа внешней силы целиком идет на покрытие расхода энергии за счет отрицательной работы силы сопротивления. Поэтому чем меньше коэффициент трения, тем больше амплитуда установившихся колебаний.

Изменение амплитуды вынужденных колебаний в зависимости от частоты при различных коэффициентах трения и одной и той же амплитуде внешней силы изображено на рисунке 3.14. Кривой *1* соответствует минимальное трение, а кривой *3* — максимальное. На этом рисунке хорошо видно, что возрастание амплитуды вынужденных колебаний

при резонансе выражено тем отчетливее, чем меньше трение в системе.

При малом трении резонанс «острый», а при большом «тупой». Если частота колебаний ω далека от резонансной, то амплитуда колебаний мала и почти не зависит от силы сопротивления в системе.

В системе с малым трением амплитуда колебаний при резонансе может быть очень большой даже в том случае, когда внешняя сила мала. Но большая амплитуда устанавливается только спустя продолжительное время после начала действия внешней силы. В соответствии с законом сохранения энергии вызвать в системе колебания с большой амплитудой, а значит, сообщить системе большую энергию небольшой внешней силой можно только за продолжительное время. Если трение велико, то амплитуда колебаний будет небольшой, и для установления колебаний не потребуется много времени.

О резонансе имеет смысл говорить, если затухание свободных колебаний в системе достаточно мало. Иначе амплитуда вынужденных колебаний при $\omega = \omega_0$ будет мало отличаться от амплитуды колебаний при других частотах.

§ 26 ВОЗДЕЙСТВИЕ РЕЗОНАНСА И БОРЬБА С НИМ

Если колебательная система находится под действием внешней периодической силы, то может наступить резонанс и связанное с ним резкое увеличение амплитуды колебаний.

Любое упругое тело, будь то мост, станина машины, ее вал, корпус корабля, представляет собой колебательную систему и характеризуется собственными частотами колебаний. При работе двигателей нередко возникают периодические усилия, связанные с движением частей двигателя (например, поршней) или с недостаточно точной центровкой их вращающихся деталей (например, валов). Если частота этих периодических усилий совпадает с частотой свободных колебаний системы, то возникает резонанс. Амплитуда колебаний может возрасти настолько, что возможна поломка машин, хотя напряжение в материале и не превышает предела прочности при статических нагрузках. Дело в том, что железо, сталь и другие материалы при переменных нагрузках со временем теряют прочность, после чего внезапно разрушаются.

Во всех этих случаях принимаются специальные меры, чтобы не допустить наступления резонанса или ослабить

его действие. Для этого увеличивают трение в системе или же добиваются, чтобы собственные частоты колебаний не совпадали с частотой внешней силы. Известны случаи, когда приходилось перестраивать океанские лайнеры, чтобы уменьшить вибрацию.

При переходе через мост воинским частям запрещается идти в ногу. Строевой шаг приводит к периодическому воздействию на мост. Если случайно частота этого воздействия совпадет с собственной частотой колебаний моста, то он может разрушиться.

Мы приводили примеры вредных последствий резонанса. Но есть и полезные.

С важными применениями резонанса мы ознакомимся в дальнейшем.



1. Два маятника представляют собой шарики одинакового радиуса, подвешенные на нитях равной длины. Массы шариков различны. Колебания какого из маятников прекратятся быстрее: легкого или тяжелого?

2. Приходилось ли вам наблюдать явление резонанса дома или на улице?

3. Для того чтобы удержать открытую дверь в вестибюле метро (дверь открывается в обе стороны и возвращается в положение равновесия пружинами), нужно приложить к ручке двери силу около 50 Н. Можно ли открыть дверь, приложив к ручке силу 0,005 Н? (Трением в петлях двери пренебречь.)

4. При каком условии резонансные свойства колебательной системы проявляются отчетливо?

* * *

Итак, мы ознакомились с механическими колебаниями. Обратим внимание на одну общую для всех колебаний особенность, отличающую их от других видов механического движения.

Как правило, при рассмотрении механического движения тела (например, движения космического корабля или планеты под действием сил всемирного тяготения) нужно бывает определить положение тела и его скорости в любой момент времени. Но при изучении периодических колебательных процессов особый интерес представляют общие признаки, характеризующие повторяемость в движении, а не положение и скорость колеблющегося тела в любой момент времени. Важно знать амплитуду, период и фазу колебаний, т. е. величины, характеризующие процесс в целом. При вынужденных колебаниях надо знать отношение частоты вынуждающей силы ω и частоты свободных колебаний ω_0. Именно оно определяет амплитуду и фазу колебаний.



ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

1. Сколько колебаний совершает математический маятник длиной $l = 4,9$ м за время $t = 5$ мин?

Решение. Период колебаний определяется по формуле

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Искомое число колебаний можно найти так:

$$n = \frac{t}{T} = \frac{t}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l}} \approx 68.$$

2. Вертикально подвешенная пружина растягивается прикрепленным к ней грузом на $\Delta l = 0,8$ см. Чему равен период T свободных колебаний груза? (Массой пружины пренебречь.)

Решение. Период колебаний груза, прикрепленного к пружине, определяется формулой

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}},$$

где m — масса груза; k — жесткость пружины. На груз действуют сила тяжести $\vec{F}_т$ и сила упругости $\vec{F}_{упр}$. Когда груз находится в равновесии, эти силы равны по модулю:

$$F_т = F_{упр}.$$

Так как $F_т = mg$ и $F_{упр} = k\Delta l$ (закон Гука), то $mg = k\Delta l$, откуда $\frac{m}{k} = \frac{\Delta l}{g}$.

Следовательно,

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\Delta l}{g}} \approx 0,2 \text{ с}.$$

3. На горизонтальном стержне находится груз, прикрепленный к пружине (см. рис. 3.3). Другой конец пружины закреплен. В некоторый момент времени груз смещают от положения равновесия на $x_m = 10$ см и отпускают. Определите координату груза спустя 1/8 периода колебаний. (Трение не учитывать.)

Решение. Зависимость координаты груза от времени выражается так:

$$x = x_m \cos \omega_0 t.$$

Поскольку $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ и $t = \frac{T}{8}$, то $x = x_m \cos\frac{\pi}{4} \approx 0,071$ м.

4. Груз, прикрепленный к пружине, колеблется на горизонтальном гладком стержне (см. рис. 3.3). Определите отношение кинетической энергии груза к потенциальной энергии системы в момент, когда груз находится в точке, расположенной посредине между крайним положением и положением равновесия.

Решение. Координата указанной точки равна половине амплитуды колебаний: $x = \frac{x_m}{2}$. Потенциальная энергия системы в момент прохождения груза через эту точку равна:

$$W_п = \frac{kx^2}{2} = \frac{kx_m^2}{8}.$$

В любой момент времени выполняется равенство

$$W_к + W_п = \frac{kx_m^2}{2}.$$

Поэтому кинетическая энергия груза в момент прохождения им указанной точки определяется так:

$$W_к = \frac{kx_m^2}{2} - W_п = \frac{kx_m^2}{2} - \frac{kx_m^2}{8} = \frac{3}{8}kx_m^2.$$

Следовательно, $\frac{W_к}{W_п} = 3$.



УПРАЖНЕНИЕ 3

1. Груз массой 100 г совершает колебания с частотой 2 Гц под действием пружины. Определите жесткость пружины.

2. В Санкт-Петербурге в Исаакиевском соборе висел маятник Фуко, длина которого была равна 98 м. Чему был равен период колебаний маятника?

3. Шарик на пружине сместили на расстояние 1 см от положения равновесия и отпустили. Какой путь пройдет шарик за 2 с, если частота его колебаний $\nu = 5$ Гц? (Затуханием колебаний можно пренебречь.)

4. Тело массой 200 г совершает колебания в горизонтальной плоскости с амплитудой 2 см под действием пружины жесткостью 16 Н/м. Определите циклическую частоту колебаний тела и энергию системы.

5. Автомобиль движется по неровной дороге, на которой расстояние между буграми приблизительно равно 8 м. Период свободных колебаний автомобиля на рессорах 1,5 с. При какой скорости автомобиля его колебания в вертикальной плоскости станут особенно заметными?

КРАТКИЕ ИТОГИ ГЛАВЫ 3

1. Колебания различной природы (механические, электрические и др.) описываются одинаковыми уравнениями. Различают свободные, затухающие и вынужденные колебания.
2. Свободные колебания возникают в системе под влиянием внутренних сил после того, как она выведена из состояния равновесия. С течением времени свободные колебания вследствие трения затухают.
3. Вынужденные колебания возникают при действии на систему внешней периодической силы. Эти колебания не затухают до тех пор, пока действует внешняя сила. Пример вынужденных колебаний: раскачивание качелей с помощью периодических толчков.
4. Свободные колебания груза, прикрепленного к пружине, можно описать вторым законом Ньютона. Его следствием применительно к данному случаю является уравнение
$$x'' = -\omega_0^2 x,$$
где x — смещение груза от положения равновесия; x'' — ускорение груза; ω_0^2 — постоянная, зависящая от свойств системы.
5. Решение уравнения, описывающего свободные колебания, выражается через косинус: $x = x_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ — или синус.
Колебания, происходящие по закону косинуса или синуса, называются гармоническими.
6. Модуль максимального смещения тела x_m от положения равновесия называется амплитудой колебаний. Величина ω_0 называется циклической частотой колебаний и выражается через частоту колебаний ν так:
$$\omega_0 = 2\pi\nu.$$
7. Промежуток времени, за который система совершает одно полное колебание, называется периодом колебаний. Период можно выразить через циклическую частоту:
$$T = \frac{2\pi}{\omega_0}.$$
8. Величину, стоящую под знаком косинуса или синуса, называют фазой колебаний. Фаза определяет положение колеблющегося тела в произвольный момент времени при заданной амплитуде колебаний.

9. Собственная циклическая частота колебаний груза, прикрепленного к пружине, зависит от его массы m и жесткости пружины k:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

Собственная циклическая частота колебаний математического маятника определяется формулой

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}},$$

где g — ускорение свободного падения, а l — длина маятника. Частота (как и период) гармонических колебаний не зависит от амплитуды.

10. Энергия колеблющегося тела при отсутствии сил трения сохраняется:

$$W = \frac{mv_x^2}{2} + \frac{kx^2}{2} = \frac{mv_m^2}{2} = \frac{kx_m^2}{2}.$$

Вынужденные колебания совершаются при воздействии на систему, в которой могут происходить колебания, периодической силы. При этом может наблюдаться резонанс: резкое возрастание амплитуды вынужденных колебаний при совпадении частоты изменения внешней силы с собственной частотой колебаний системы. Резонанс проявляется отчетливо лишь в системах с малым трением.

Глава 4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

В этой главе мы будем изучать электромагнитные колебания. Особо отметим единство колебательных процессов различной природы.

§ 27 СВОБОДНЫЕ И ВЫНУЖДЕННЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Электромагнитные колебания были открыты почти случайно. После того как изобрели лейденскую банку (первый конденсатор) и научились сообщать ей большой заряд с помощью электростатической машины, начали изучать электрический разряд банки. Замыкая обкладки лейденской банки с помощью проволочной катушки, обнаружили, что стальные спицы внутри катушки намагничиваются. В этом ничего удивительного не было: электрический ток и должен намагничивать стальной сердечник катушки. Странным же

было то, что нельзя было предсказать, какой конец сердечника катушки окажется северным полюсом, а какой — южным. Повторяя опыт примерно в одинаковых условиях, получали в одних случаях один результат, а в других — другой. Далеко не сразу поняли, что при разрядке конденсатора через катушку в электрической цепи возникают колебания. За время разрядки конденсатор успевает много раз перезарядиться, и ток меняет направление много раз, в результате чего сердечник может намагничиваться различным образом.

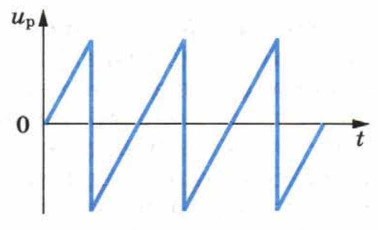


Рис. 4.1

Периодические или почти периодические изменения заряда, силы тока и напряжения называются **электромагнитными колебаниями.** Обычно эти колебания происходят с очень большой частотой, значительно превышающей частоту механических колебаний. Поэтому для их наблюдения и исследования очень удобен электронный осциллограф.

В электронно-лучевой трубке осциллографа узкий пучок электронов попадает на экран, способный светиться при его бомбардировке электронами. На горизонтально отклоняющие пластины трубки подается переменное напряжение развертки u_p пилообразной формы (рис. 4.1). Сравнительно медленно напряжение повышается, а потом очень резко понижается. Электрическое поле между пластинами заставляет электронный луч пробегать экран в горизонтальном направлении с постоянной скоростью и затем почти мгновенно возвращаться назад. После этого весь процесс повторяется. Если теперь присоединить вертикально отклоняющие пластины трубки к конденсатору, то колебания напряжения при его разрядке вызовут колебания луча в вертикальном направлении. В результате на экране образуется временнáя развертка колебаний (рис. 4.2), подобная той, которую вычерчивает маятник с песочницей над движущимся листом бумаги. Колебания затухают с течением времени.



Рис. 4.2

Эти колебания являются свободными. **Свободными колебаниями** называются колебания, которые возникают в системе после выведения ее из положения равновесия. В нашем случае колебательная система (конденсатор и катушка) выводится из равновесия при сообщении конденсатору заряда. Зарядка конденсатора эквивалентна отклонению маятника от положения равновесия.

Нетрудно получить в электрической цепи также и вынужденные электромагнитные колебания. **Вынужденными колебаниями** называются колебания в цепи под действием внешней периодически изменяющейся электродвижущей силы.

Свободные электромагнитные колебания возникают при разрядке конденсатора через катушку индуктивности. Вынужденные колебания вызываются периодической ЭДС.



1. Что называют электромагнитными колебаниями?
2. В чем различие между свободными и вынужденными электромагнитными колебаниями?

§ 28 КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ КОНТУР. ПРЕВРАЩЕНИЕ ЭНЕРГИИ ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЯХ

Простейшая система, в которой могут происходить свободные электромагнитные колебания, состоит из конденсатора и катушки, присоединенной к его обкладкам (рис. 4.3), и называется **колебательным контуром.**

Зарядим конденсатор, присоединив его на некоторое время к батарее с помощью переключателя (рис. 4.4, *а*). При этом конденсатор получит энергию

$$W_э = \frac{q_m^2}{2C}, \qquad (4.1)$$

где q_m — заряд конденсатора, а C — его электроемкость. Между обкладками конденсатора возникнет разность потенциалов U_m.

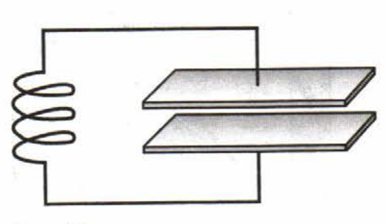


Рис. 4.3

Переведем переключатель в положение *2* (рис. 4.4, *б*). Конденсатор начнет разряжаться, и в цепи появится электрический ток. Сила тока не сразу достигает максимального значения, а увеличивается постепенно. Это связано с явлением

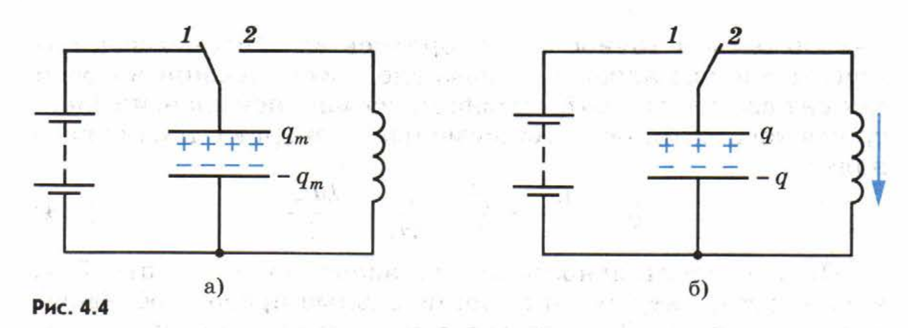


Рис. 4.4

самоиндукции. ЭДС самоиндукции возникает при появлении тока в цепи и препятствует его увеличению, поэтому ток в цепи растет постепенно.

По мере разрядки конденсатора энергия электрического поля уменьшается, но одновременно возрастает энергия магнитного поля тока, которая определяется формулой

$$W_{\text{м}} = \frac{Li^2}{2}. \qquad (4.2)$$

где i — сила переменного тока; L — индуктивность катушки.

Полная энергия W электромагнитного поля контура равна сумме энергий его магнитного и электрического полей:

$$W = \frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C}. \qquad (4.3)$$

В момент, когда конденсатор полностью разрядится ($q = 0$), энергия электрического поля станет равной нулю. Энергия же магнитного поля тока, согласно закону сохранения энергии, будет максимальной. В этот момент сила тока также достигнет, конечно, максимального значения I_m.

Несмотря на то что к этому моменту разность потенциалов на концах катушки становится равной нулю, электрический ток не может прекратиться сразу. Этому препятствует явление самоиндукции. Как только сила тока и созданное им магнитное поле начнут уменьшаться, возникает ЭДС самоиндукции, стремящаяся поддержать ток.

В результате конденсатор будет перезаряжаться до тех пор, пока сила тока, постепенно уменьшаясь, не станет равной нулю. Энергия магнитного поля в этот момент также будет равна нулю, энергия электрического поля конденсатора опять станет максимальной.

После этого конденсатор вновь начнет перезаряжаться, и система возвратится в исходное состояние. Если бы не было потерь энергии, то этот процесс продолжался бы сколь угодно долго. Колебания были бы незатухающими. Через промежутки времени, равные периоду колебаний, состоя-

ние системы в точности повторялось бы. Полная энергия при этом сохранялась бы неизменной, и ее значение в любой момент времени было бы равно максимальной энергии электрического поля или максимальной энергии магнитного поля:

$$W = \frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C} = \frac{q_m^2}{2C} = \frac{LI_m^2}{2}. \qquad (4.4)$$

Но в действительности потери энергии неизбежны. Так, в частности, катушка и соединительные провода обладают сопротивлением R, а это ведет к постепенному превращению энергии электромагнитного поля во внутреннюю энергию проводника.

В колебательном контуре энергия электрического поля заряженного конденсатора периодически переходит в энергию магнитного поля тока. При отсутствии сопротивления в контуре полная энергия электромагнитного поля остается неизменной.



1. **Чему равна энергия контура в произвольный момент времени?**
2. **Почему при подключении конденсатора к катушке он разряжается постепенно?**

§ 29 АНАЛОГИЯ МЕЖДУ МЕХАНИЧЕСКИМИ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ

Электромагнитные колебания в контуре имеют сходство со свободными механическими колебаниями, например с колебаниями тела, закрепленного на пружине (пружинный маятник). Сходство относится не к природе самих величин, которые периодически изменяются, а к процессам периодического изменения различных величин.

При механических колебаниях периодически изменяются координата тела x и проекция его скорости v_x, а при электромагнитных колебаниях изменяются заряд q конденсатора и сила тока i в цепи. Одинаковый характер изменения величин (механических и электрических) объясняется тем, что имеется аналогия в условиях, при которых возникают механические и электромагнитные колебания.

Возвращение к положению равновесия тела на пружине вызывается силой упругости $F_{x\ упр}$, пропорциональной смещению тела от положения равновесия. Коэффициентом пропорциональности является жесткость пружины k.

Разрядка конденсатора (появление тока) обусловлена напряжением u между пластинами конденсатора, которое про-

порционально заряду q. Коэффициентом пропорциональности является величина $\frac{1}{C}$, обратная емкости, так как $u = \frac{1}{C}q$.

Подобно тому как, вследствие инертности, тело лишь постепенно увеличивает скорость под действием силы и эта скорость после прекращения действия силы не становится сразу равной нулю, электрический ток в катушке за счет явления самоиндукции увеличивается под действием напряжения постепенно и не исчезает сразу, когда это напряжение становится равным нулю. Индуктивность контура L выполняет ту же роль, что и масса тела m при механических колебаниях. Соответственно кинетическая энергия тела $\frac{mv_x^2}{2}$ аналогична энергии магнитного поля тока $\frac{Li^2}{2}$.

Зарядка конденсатора от батареи аналогична сообщению телу, прикрепленному к пружине, потенциальной энергии $\frac{kx_m^2}{2}$ при смещении тела на расстояние x_m от положения равновесия (рис. 4.5, *а*). Сравнивая это выражение с энергией конденсатора $\frac{q_m^2}{2C}$, замечаем, что жесткость k пружины выполняет при механических колебаниях такую же роль, как величина $\frac{1}{C}$, обратная емкости, при электромагнитных колебаниях. При этом начальная координата x_m соответствует заряду q_m.

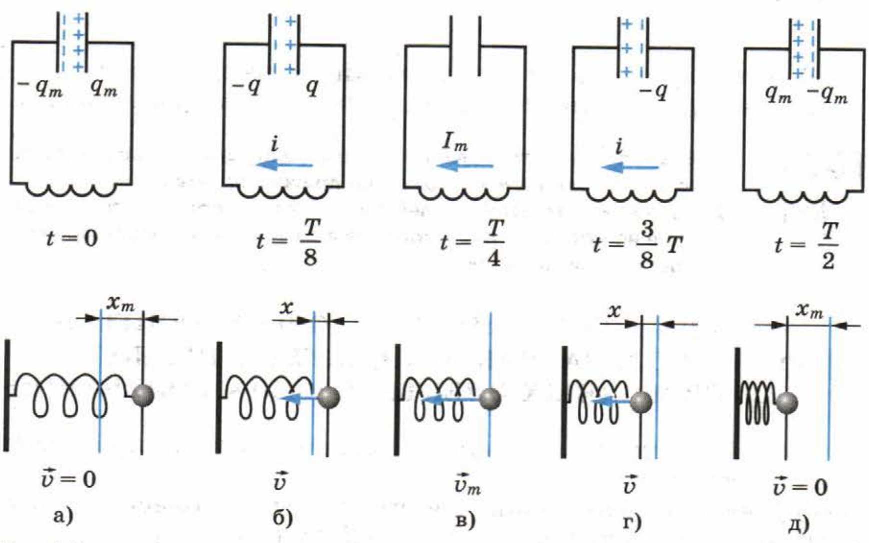


Рис. 4.5

Возникновение в электрической цепи тока i соответствует появлению в механической колебательной системе скорости тела v_x под действием силы упругости пружины (рис. 4.5, *б*).

Момент времени, когда конденсатор разрядится, а сила тока достигнет максимума, аналогичен тому моменту времени, когда тело будет проходить с максимальной скоростью (рис. 4.5, *в*) положение равновесия.

Далее конденсатор в ходе электромагнитных колебаний начнет перезаряжаться, а тело в ходе механических колебаний — смещаться влево от положения равновесия (рис. 4.5, *г*). По прошествии половины периода T конденсатор полностью перезарядится и сила тока станет равной нулю.

При механических колебаниях этому соответствует отклонение тела в крайнее левое положение, когда его скорость равна нулю (рис. 4.5, *д*).

Соответствие между механическими и электрическими величинами при колебательных процессах можно свести в таблицу.

Механическая величина	Электрическая величина
Координата x	Заряд q
Скорость v_x	Сила тока i
Масса m	Индуктивность L
Жесткость пружины k	Величина, обратная емкости, $\frac{1}{C}$
Потенциальная энергия $\frac{kx^2}{2}$	Энергия электрического поля $\frac{q^2}{2C}$
Кинетическая энергия $\frac{mv_x^2}{2}$	Энергия магнитного поля $\frac{Li^2}{2}$

Электромагнитные и механические колебания имеют разную природу, но описываются одинаковыми уравнениями.



1. **В чем проявляется аналогия между электромагнитными колебаниями в контуре и колебаниями пружинного маятника?**
2. **За счет какого явления электрический ток в колебательном контуре не исчезает сразу, когда напряжение на конденсаторе становится равным нулю?**

§ 30 УРАВНЕНИЕ, ОПИСЫВАЮЩЕЕ ПРОЦЕССЫ В КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ. ПЕРИОД СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Перейдем теперь к количественной теории процессов в колебательном контуре.

Уравнение, описывающее процессы в колебательном контуре. Рассмотрим колебательный контур, сопротивлением R которого можно пренебречь (рис. 4.6).

Уравнение, описывающее свободные электрические колебания в контуре, можно получить с помощью закона сохранения энергии. Полная электромагнитная энергия W контура в любой момент времени равна сумме его энергий магнитного и электрического полей:

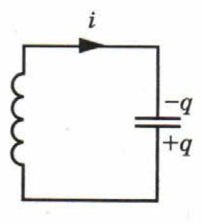


Рис. 4.6

$$W = \frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C}.$$

Эта энергия не меняется с течением времени, если сопротивление R контура равно нулю. Значит, производная полной энергии по времени равна нулю. Следовательно, равна нулю сумма производных по времени от энергий магнитного и электрического полей:

$$\left(\frac{Li^2}{2}\right)' + \left(\frac{q^2}{2C}\right)' = 0,$$

или

$$\left(\frac{Li^2}{2}\right)' = -\left(\frac{q^2}{2C}\right)'. \qquad (4.5)$$

Физический смысл уравнения (4.5) состоит в том, что скорость изменения энергии магнитного поля по модулю равна скорости изменения энергии электрического поля; знак «–» указывает на то, что, когда энергия электрического поля возрастает, энергия магнитного поля убывает (и наоборот).

Вычислив производные в уравнении (4.5), получим[1]

$$\frac{L}{2} \cdot 2ii' = -\frac{1}{2C} \cdot 2qq'. \qquad (4.6)$$

Но производная заряда по времени представляет собой силу тока в данный момент времени:

$$i = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = q'. \qquad (4.7)$$

Поэтому уравнение (4.6) можно переписать в следующем виде:

$$Li'i = -\frac{qi}{C}. \qquad (4.8)$$

[1] Мы вычисляем производные по времени. Поэтому производная $(i^2)'$ равна не просто $2i$, как было бы при вычислении производной по i. Нужно $2i$ умножить еще на производную i' силы тока по времени, так как вычисляется производная от сложной функции. То же самое относится к производной $(q^2)'$.

Производная силы тока по времени есть не что иное, как вторая производная заряда по времени, подобно тому как производная скорости по времени (ускорение) есть вторая производная координаты по времени. Подставив в уравнение (4.8) $i' = q''$ и разделив левую и правую части этого уравнения на Li, получим основное уравнение, описывающее свободные электрические колебания в контуре:

$$q'' = -\frac{1}{LC}q. \tag{4.9}$$

Теперь вы в полной мере можете оценить значение тех усилий, которые были затрачены для изучения колебаний шарика на пружине и математического маятника. Ведь уравнение (4.9) ничем, кроме обозначений, не отличается от уравнения (3.11), описывающего колебания шарика на пружине. При замене в уравнении (3.11) x на q, x'' на q'', k на $1/C$ и m на L мы в точности получим уравнение (4.9). Но уравнение (3.11) было уже решено выше. Поэтому, зная формулу, описывающую колебания пружинного маятника, мы сразу же можем записать формулу для описания электрических колебаний в контуре.

Формула Томсона. В уравнении (3.11) коэффициент $\frac{k}{m}$ представляет собой квадрат собственной частоты колебаний. Поэтому и коэффициент $\frac{1}{LC}$ в уравнении (4.9) также представляет собой квадрат циклической частоты — в этот раз для свободных электрических колебаний:

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC},\ \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \tag{4.10}$$

Период свободных колебаний в контуре, таким образом, равен:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC}. \tag{4.11}$$

Формула (4.11) называется **формулой Томсона** в честь английского физика У. Томсона (Кельвина), который ее впервые вывел.

Увеличение периода свободных колебаний с возрастанием L и C наглядно можно пояснить так. При увеличении индуктивности L ток медленнее нарастает со временем и медленнее падает до нуля. А чем больше емкость C, тем большее время требуется для перезарядки конденсатора.

Гармонические колебания заряда и тока. Подобно тому как координата при механических колебаниях (в случае, когда в начальный момент времени отклонение тела маятника от положения равновесия максимально) изменяется со временем по гармоническому закону:

$$x = x_m \cos \omega_0 t,$$

заряд конденсатора меняется с течением времени по такому же закону:

$$q = q_m \cos \omega_0 t, \quad (4.12)$$

где q_m — амплитуда колебаний заряда.

Сила тока также совершает гармонические колебания:

$$i = q' = -\omega_0 q_m \sin \omega_0 t = I_m \cos\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2}\right), \quad (4.13)$$

где $I_m = q_m \omega_0$ — амплитуда колебаний силы тока. Колебания силы тока опережают по фазе на $\frac{\pi}{2}$ колебания заряда (рис. 4.7).

Точно так же колебания скорости тела в случае пружинного или математического маятника опережают на $\frac{\pi}{2}$ колебания координаты (смещения) этого тела.

В действительности, из-за неизбежного наличия сопротивления электрической цепи, колебания будут затухающими. Сопротивление R также будет влиять и на период колебаний, чем больше сопротивление R, тем бóльшим будет период колебаний. При достаточно большом сопротивлении колебания совсем не возникнут. Конденсатор разрядится, но перезарядки его не произойдет, энергия электрического и магнитного полей перейдет в тепло.

Простейшая система, где наблюдаются свободные электромагнитные колебания, — колебательный контур. Уравнение (4.9) — это основное уравнение, описывающее свободные электрические колебания в контуре.

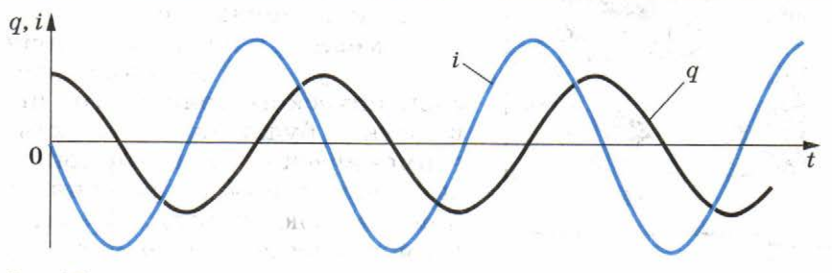


Рис. 4.7



1. **В чем различие между свободными и вынужденными электрическими колебаниями?**
2. **Как изменится период свободных электрических колебаний в контуре, если емкость конденсатора в нем вдвое увеличить или же вдвое уменьшить?**
3. **Как связаны амплитуды колебаний заряда и тока при разрядке конденсатора через катушку?**

§ 31 ПЕРЕМЕННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

Свободные электромагнитные колебания в контуре быстро затухают, и поэтому они практически не используются. Напротив, незатухающие вынужденные колебания имеют огромное практическое значение.

Переменный ток в осветительной сети квартиры, применяемый на заводах и фабриках и т. д., представляет собой не что иное, как вынужденные электромагнитные колебания. Сила тока и напряжение меняются со временем по гармоническому закону.

Колебания напряжения легко обнаружить с помощью осциллографа. Если на вертикально отклоняющие пластины осциллографа подать напряжение от сети, то временна́я развертка на экране будет представлять собой синусоиду (рис. 4.8). Зная скорость движения луча по экрану в горизонтальном направлении (она определяется частотой пилообразного напряжения), можно вычислить частоту колебаний. Частота переменного тока — это число колебаний в 1 с. Стандартная частота промышленного переменного тока равна 50 Гц. Это означает, что на протяжении 1 с ток 50 раз идет в одну сторону и 50 раз — в противоположную. Частота 50 Гц принята для промышленного тока во многих странах мира. В США принята частота 60 Гц.



Рис. 4.8

Если напряжение на концах цепи меняется по гармоническому закону, то и напряженность электрического поля внутри проводников будет также меняться гармонически. Эти гармонические изменения напряженности поля, в свою очередь, вызывают гармонические колебания скорости упорядоченного движения

заряженных частиц и, следовательно, гармонические колебания силы тока.

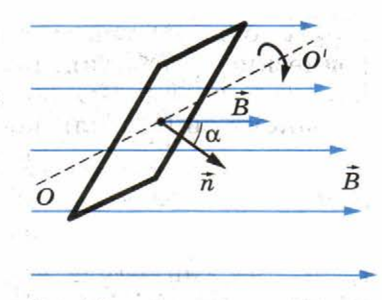


Рис. 4.9

Но при изменении напряжения на концах цепи электрическое поле не меняется мгновенно во всей цепи. Изменения поля распространяются хотя и с очень большой, но не с бесконечно большой скоростью.

Однако, если время распространения изменений поля в цепи много меньше периода колебаний напряжения, можно считать, что электрическое поле во всей цепи сразу же меняется при изменении напряжения на концах цепи. При этом сила тока в данный момент времени будет иметь практически одно и то же значение во всех сечениях неразветвленной цепи.

Переменное напряжение в гнездах розетки осветительной сети создается генераторами на электростанциях. Проволочную рамку, вращающуюся в постоянном однородном магнитном поле, можно рассматривать как простейшую модель генератора переменного тока. Поток магнитной индукции Φ, пронизывающий проволочную рамку площадью S, пропорционален косинусу угла α между нормалью к рамке и вектором магнитной индукции (рис. 4.9):

$$\Phi = BS\cos\alpha.$$

При равномерном вращении рамки угол α увеличивается прямо пропорционально времени:

$$\alpha = \omega t,$$

где ω — угловая скорость вращения рамки. Поток магнитной индукции меняется по гармоническому закону:

$$\Phi = BS\cos\omega t.$$

Здесь величина ω играет уже роль циклической частоты.

Согласно закону электромагнитной индукции ЭДС индукции в рамке равна взятой со знаком «−» скорости изменения потока магнитной индукции, т. е. производной потока магнитной индукции по времени:

$$e = -\Phi' = -BS(\cos\omega t)' = BS\omega\cdot\sin\omega t = \mathcal{E}_m\sin\omega t,$$

где $\mathcal{E}_m = BS\omega$ — амплитуда ЭДС индукции.

Если к рамке подключить колебательный контур, то угловая скорость ω вращения рамки определит частоту ω колебаний значений ЭДС, напряжения на различных участках цепи и силы тока.

Мы будем изучать в дальнейшем вынужденные электрические колебания, происходящие в цепях под действием напряжения, меняющегося с циклической частотой ω по закону синуса или косинуса:

$$u = U_m \sin \omega t$$

или

$$u = U_m \cos \omega t, \qquad (4.14)$$

где U_m — амплитуда напряжения, т. е. максимальное по модулю значение напряжения.

Если напряжение меняется с циклической частотой ω, то и сила тока в цепи будет меняться с той же частотой. Но колебания силы тока не обязательно должны совпадать по фазе с колебаниями напряжения. Поэтому в общем случае сила тока i в любой момент времени (мгновенное значение силы тока) определяется по формуле

$$i = I_m \sin (\omega t + \varphi_c). \qquad (4.15)$$

Здесь I_m — амплитуда силы тока, т. е. максимальное по модулю значение силы тока, а φ_c — разность (сдвиг) фаз между колебаниями силы тока и напряжения.

В промышленных цепях переменного тока сила тока и напряжение меняются гармонически с частотой $\nu = 50$ Гц. Переменное напряжение на концах цепи создается генераторами на электростанциях.



1. **При каких условиях в электрической цепи возникают вынужденные электромагнитные колебания?**
2. **Одинаково ли мгновенное значение силы переменного тока в данный момент времени во всех участках неразветвленной цепи?**

§ 32 АКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ. ДЕЙСТВУЮЩИЕ ЗНАЧЕНИЯ СИЛЫ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

Перейдем к более детальному рассмотрению процессов, которые происходят в цепи, подключенной к источнику переменного напряжения.

Сила тока в цепи с резистором. Пусть цепь состоит из соединительных проводов и нагрузки с малой индуктивностью и большим сопротивлением R (рис. 4.10). Эту величину, которую мы до сих пор называли электрическим сопротивлением или просто сопротивлением, теперь будем называть **активным сопротивлением**.

Сопротивление R называется активным, потому что при наличии нагрузки, обладающей этим сопротивлением, цепь поглощает энергию, поступающую от генератора. Эта энергия превращается во внутреннюю энергию проводников — они нагреваются. Будем считать, что напряжение на зажимах цепи меняется по гармоническому закону:

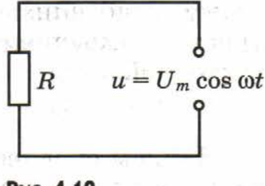


Рис. 4.10

$$u = U_m \cos \omega t.$$

Как и в случае постоянного тока, мгновенное значение силы тока прямо пропорционально мгновенному значению напряжения. Поэтому для нахождения мгновенного значения силы тока можно применить закон Ома:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m \cos \omega t}{R} = I_m \cos \omega t. \qquad (4.16)$$

В проводнике с активным сопротивлением колебания силы тока совпадают по фазе с колебаниями напряжения (рис. 4.11), *а амплитуда силы тока определяется равенством*

$$I_m = \frac{U_m}{R}. \qquad (4.17)$$

Мощность в цепи с резистором. В цепи переменного тока промышленной частоты ($\nu = 50$ Гц) сила тока и напряжение изменяются сравнительно быстро. Поэтому при прохождении тока по проводнику, например по нити электрической лампочки, количество выделенной энергии также будет быстро меняться со временем. Но этих быстрых изменений мы не замечаем.

Как правило, нам нужно бывает знать *среднюю мощность* тока на участке цепи за большой промежуток времени, включающий много периодов. Для этого достаточно найти среднюю мощность за один период. Под средней за период мощностью переменного тока понимают отношение суммарной энергии, поступающей в цепь за период, к периоду.

Мощность в цепи постоянного тока на участке с сопротивлением R определяется формулой

$$P = I^2 R. \qquad (4.18)$$

На протяжении очень малого интервала времени переменный ток можно считать практически постоянным. По-

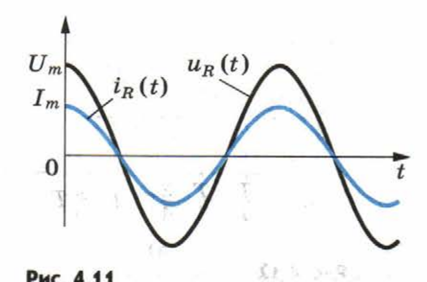


Рис. 4.11

этому мгновенная мощность в цепи переменного тока на участке, имеющем активное сопротивление R, определяется формулой

$$P = i^2R. \qquad (4.19)$$

Найдем среднее значение мощности за период. Для этого сначала преобразуем формулу (4.19), подставляя в нее выражение (4.16) для силы тока и используя известное из математики соотношение $\cos^2 \alpha = \frac{1 + \cos 2\alpha}{2}$:

$$P = \frac{I_m^2 R}{2}(1 + \cos 2\omega t) = \frac{I_m^2 R}{2} + \frac{I_m^2 R}{2}\cos 2\omega t. \qquad (4.20)$$

График зависимости мгновенной мощности от времени изображен на рисунке 4.12, *а*. Согласно графику (рис. 4.12, *б*), на протяжении одной восьмой периода, когда $\cos 2\omega t > 0$, мощность в любой момент времени больше, чем $\frac{I_m^2 R}{2}$. Зато на протяжении следующей восьмой части периода, когда $\cos 2\omega t < 0$, мощность в любой момент времени меньше, чем $\frac{I_m^2 R}{2}$. Среднее за период значение $\cos 2\omega t$ равно нулю, а значит равно нулю второе слагаемое в уравнении (4.20).

Средняя мощность $\overline{P}$ равна, таким образом, первому члену в формуле (4.20):

$$\overline{P} = \overline{i^2}R = \frac{I_m^2 R}{2}. \qquad (4.21)$$

Действующие значения силы тока и напряжения. Из формулы (4.21) видно, что величина $\frac{I_m^2}{2}$ есть среднее за период значение квадрата силы тока:

$$\overline{i^2} = \frac{I_m^2}{2}. \qquad (4.22)$$

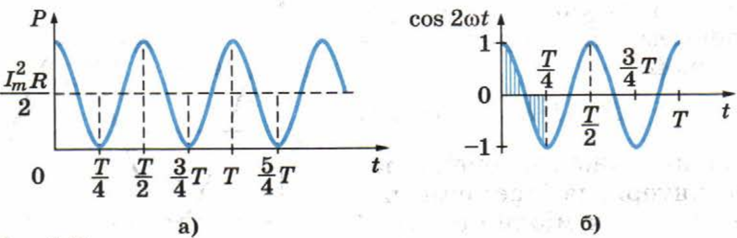


Рис. 4.12

Величина, равная квадратному корню из среднего значения квадрата силы тока, называется **действующим значением силы переменного тока.** Действующее значение силы переменного тока обозначается через I:

$$I = \sqrt{\overline{i^2}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \qquad (4.23)$$

Действующее значение силы переменного тока равно силе такого постоянного тока, при котором в проводнике выделяется то же количество теплоты, что и при переменном токе за то же время.

Действующее значение переменного напряжения определяется аналогично действующему значению силы тока:

$$U = \sqrt{\overline{u^2}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \qquad (4.24)$$

Заменяя в формуле (4.17) амплитудные значения силы тока и напряжения на их действующие значения, получаем

$$I = \frac{U}{R}. \qquad (4.25)$$

Это закон Ома для участка цепи переменного тока с резистором.

Как и при механических колебаниях, в случае электрических колебаний обычно нас не интересуют значения силы тока, напряжения и других величин в каждый момент времени. Важны общие характеристики колебаний, такие, как амплитуда, период, частота, действующие значения силы тока и напряжения, средняя мощность. Именно действующие значения силы тока и напряжения регистрируют амперметры и вольтметры переменного тока.

Кроме того, действующие значения удобнее мгновенных значений еще и потому, что именно они непосредственно определяют среднее значение мощности P переменного тока:

$$P = I^2R = UI.$$

Колебания силы тока в цепи с резистором совпадают по фазе с колебаниями напряжения, а мощность определяется действующими значениями силы тока и напряжения.



1. **Чему равна амплитуда напряжения в осветительных сетях переменного тока, рассчитанных на напряжение 220 В?**
2. **Что называют действующими значениями силы тока и напряжения?**

§ 33 КОНДЕНСАТОР В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

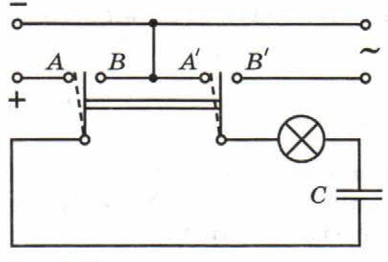


Рис. 4.13

Постоянный ток не может идти по цепи, содержащей конденсатор. Ведь фактически при этом цепь оказывается разомкнутой, так как обкладки конденсатора разделены диэлектриком. Переменный же ток может идти по цепи, содержащей конденсатор. В этом можно убедиться с помощью простого опыта.

Пусть у нас имеются источники постоянного и переменного напряжений, причем постоянное напряжение на зажимах источника равно действующему значению переменного напряжения. Цепь состоит из конденсатора и лампы накаливания (рис. 4.13), соединенных последовательно. При включении постоянного напряжения (переключатель повернут влево, цепь подключена к точкам AA') лампа не светится. Но при включении переменного напряжения (переключатель повернут вправо, цепь подключена к точкам BB') лампа загорается, если емкость конденсатора достаточно велика.

Как же переменный ток может идти по цепи, если она фактически разомкнута (между пластинами конденсатора заряды перемещаться не могут)? Все дело в том, что происходит периодическая зарядка и разрядка конденсатора под действием переменного напряжения. Ток, идущий в цепи при перезарядке конденсатора, нагревает нить лампы.

Установим, как меняется со временем сила тока в цепи, содержащей только конденсатор, если сопротивлением проводов и обкладок конденсатора можно пренебречь (рис. 4.14).

Напряжение на конденсаторе

$$u = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{q}{C}$$

равно напряжению на концах цепи. Следовательно,

$$\frac{q}{C} = U_m \cos \omega t. \qquad (4.26)$$

Заряд конденсатора меняется по гармоническому закону:

$$q = CU_m \cos \omega t. \qquad (4.27)$$

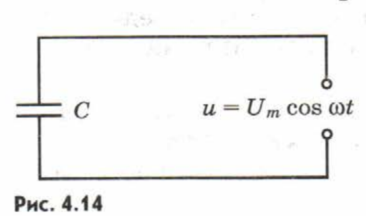


Рис. 4.14

Сила тока, представляющая собой производную заряда по времени, равна:

$$i = q' = -U_m C\omega \sin \omega t = U_m C\omega \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right). \qquad (4.28)$$

Следовательно, *колебания силы тока опережают по фазе колебания напряжения на конденсаторе на* $\frac{\pi}{2}$ (рис. 4.15).

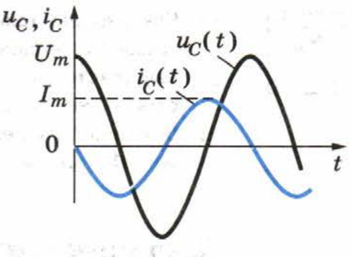


Рис. 4.15

Амплитуда силы тока равна:

$$I_m = U_m C\omega. \qquad (4.29)$$

Если ввести обозначение

$$\frac{1}{\omega C} = X_C \qquad (4.30)$$

и вместо амплитуд силы тока и напряжения использовать их действующие значения, то получим

$$I = \frac{U}{X_C}. \qquad (4.31)$$

Величину X_C, обратную произведению ωC циклической частоты на электрическую емкость конденсатора, называют **емкостным сопротивлением**. Роль этой величины аналогична роли активного сопротивления R в законе Ома (см. формулу (4.17)). Действующее значение силы тока связано с действующим значением напряжения на конденсаторе точно так же, как связаны согласно закону Ома сила тока и напряжение для участка цепи постоянного тока. Это и позволяет рассматривать величину X_C как сопротивление конденсатора переменному току (емкостное сопротивление).

Чем больше емкость конденсатора, тем больше ток перезарядки. Это легко обнаружить по увеличению накала лампы при увеличении емкости конденсатора. В то время как сопротивление конденсатора постоянному току бесконечно велико, его сопротивление переменному току имеет конечное значение X_C. С увеличением емкости оно уменьшается. Уменьшается оно и с увеличением частоты ω.

В заключение отметим, что на протяжении четверти периода, когда конденсатор заряжается до максимального напряжения, энергия поступает в цепь и запасается в конденсаторе в форме энергии электрического поля. В следующую четверть периода, при разрядке конденсатора, эта энергия возвращается в сеть.

Сопротивление цепи с конденсатором обратно пропорционально произведению циклической частоты на электроемкость. Колебания силы тока опережают по фазе колебания напряжения на $\frac{\pi}{2}$.



1. **Как связаны между собой действующие значения силы тока и напряжения на конденсаторе в цепи переменного тока?**
2. **Выделяется ли энергия в цепи, содержащей только конденсатор, если активным сопротивлением цепи можно пренебречь?**
3. **Выключатель цепи представляет собой своего рода конденсатор. Почему же выключатель надежно размыкает цепь?**

§ 34 КАТУШКА ИНДУКТИВНОСТИ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Индуктивность в цепи влияет на силу переменного тока. Это можно доказать с помощью простого опыта.

Соберем цепь из катушки с большой индуктивностью и электрической лампы накаливания (рис. 4.16). С помощью переключателя можно подключить эту цепь либо к источнику постоянного напряжения, либо к источнику переменного напряжения. При этом постоянное напряжение и действующее значение переменного напряжения должны быть равны. Опыт показывает, что лампа светится ярче при постоянном напряжении. Следовательно, действующее значение силы переменного тока в рассматриваемой цепи меньше силы постоянного тока.

Объясняется это различие явлением самоиндукции. В § 15 главы 2 рассказывалось о том, что при подключении катушки к источнику постоянного напряжения сила тока в цепи нарастает постепенно. Возникающее при этом вихревое электрическое поле тормозит движение электронов. Лишь по прошествии некоторого времени сила тока достигает наибольшего (установившегося) значения, соответствующего данному постоянному напряжению.

Если напряжение быстро меняется, то сила тока не будет успевать достигнуть тех значений, которые она приобрела бы с течением времени при постоянном напряжении.

Следовательно, максимальное значение силы переменного тока (его амплитуда) ограничивается индуктивностью цепи и будет тем меньше, чем больше индуктивность и чем больше частота приложенного напряжения.

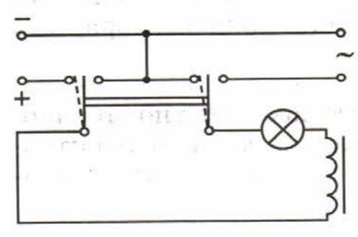


Рис. 4.16

Определим силу тока в цепи, содержащей катушку, активным сопротивлением которой можно пренебречь (рис. 4.17). Для этого предварительно найдем связь между напряжением на катушке и ЭДС самоиндукции в ней.

Если сопротивление катушки равно нулю, то и напряженность

электрического поля внутри проводника в любой момент времени должна быть равна нулю. Иначе сила тока, согласно закону Ома, была бы бесконечно большой. Равенство нулю напряженности поля оказывается возможным потому, что напряженность вихревого электрического поля $\vec{E}_i$, порождаемого переменным магнитным полем, в каждой точке равна по модулю и противоположна по направлению напряженности кулоновского поля $\vec{E}_к$, создаваемого в проводнике зарядами, расположенными на зажимах источника и в проводах цепи.

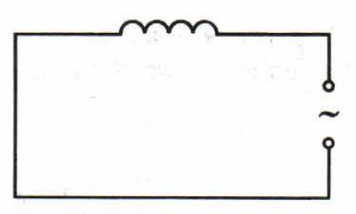


Рис. 4.17

Из равенства $\vec{E}_i = -\vec{E}_к$ следует, что *удельная работа вихревого поля* (т. е. ЭДС самоиндукции e_i) *равна по модулю и противоположна по знаку удельной работе кулоновского поля*. Учитывая, что удельная работа кулоновского поля равна напряжению на концах катушки, можно записать: $e_i = -u$.

При изменении силы тока по гармоническому закону

$$i = I_m \sin \omega t$$

ЭДС самоиндукции равна:

$$e_i = -Li' = -L\omega I_m \cos \omega t. \qquad (4.32)$$

Так как $u = -e_i$, то напряжение на концах катушки оказывается равным

$$u = L\omega I_m \cos \omega t = L\omega I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right),$$

где $U_m = L\omega I_m$ — амплитуда напряжения.

Следовательно, колебания напряжения на катушке опережают по фазе колебания силы тока на $\frac{\pi}{2}$, или, что то же самое, *колебания силы тока отстают по фазе от колебаний напряжения на* $\frac{\pi}{2}$ (рис. 4.18).

Амплитуда силы тока в катушке равна:

$$I_m = \frac{U_m}{\omega L}. \qquad (4.33)$$

Если ввести обозначение

$$\omega L = X_L \qquad (4.34)$$

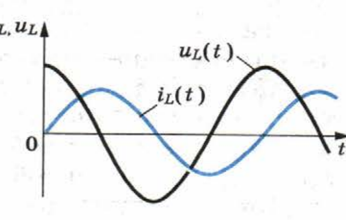


Рис. 4.18

и вместо амплитуд силы тока и напряжения использовать их действующие значения, то получим:

$$I = \frac{U}{X_L}. \qquad (4.35)$$

Величину X_L, равную произведению циклической частоты на индуктивность, называют **индуктивным сопротивлением.**

Согласно формуле (4.35) действующее значение силы тока связано с действующим значением напряжения и индуктивным сопротивлением соотношением, подобным закону Ома для цепи постоянного тока.

Индуктивное сопротивление зависит от частоты ω. Постоянный ток вообще «не замечает» индуктивности катушки. При $\omega = 0$ индуктивное сопротивление равно нулю ($X_L = 0$).

Чем быстрее меняется напряжение, тем больше ЭДС самоиндукции и тем меньше амплитуда силы тока.

Катушка индуктивности оказывает сопротивление переменному току. Это сопротивление, называемое индуктивным, равно произведению циклической частоты на индуктивность. Колебания силы тока в цепи с индуктивностью отстают по фазе от колебаний напряжения на $\frac{\pi}{2}$.



1. **Как связаны между собой действующие значения силы тока и напряжения на катушке индуктивности, активным сопротивлением которой можно пренебречь?**
2. **Почему ЭДС самоиндукции и напряжение на катушке имеют противоположные знаки?**

§ 35 РЕЗОНАНС В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

При изучении вынужденных механических колебаний мы ознакомились с явлением резонанса. Резонанс наблюдается в том случае, когда собственная частота колебаний системы совпадает с частотой изменения внешней силы. Если трение мало, то амплитуда установившихся вынужденных колебаний при резонансе резко увеличивается. Совпадение вида уравнений для описания механических и электромагнитных колебаний позволяет сделать заключение о возможности резонанса также и в электрической цепи, если эта цепь представляет собой колебательный контур, обладающий определенной собственной частотой колебаний.

При механических колебаниях резонанс выражен отчетливо при малых значениях коэффициента трения μ. В элек-

трической цепи роль коэффициента трения выполняет ее активное сопротивление R. Ведь именно наличие этого сопротивления в цепи приводит к превращению энергии тока во внутреннюю энергию проводника (проводник нагревается). Поэтому резонанс в электрическом колебательном контуре должен быть выражен отчетливо при малом активном сопротивлении R.

Мы с вами уже знаем, что если активное сопротивление мало, то собственная циклическая частота колебаний в контуре определяется формулой

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Сила тока при вынужденных колебаниях должна достигать максимальных значений, когда частота переменного напряжения, приложенного к контуру, равна собственной частоте колебательного контура:

$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \qquad (4.36)$$

Резонансом в электрическом колебательном контуре называется явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний силы тока при совпадении частоты внешнего переменного напряжения с собственной частотой колебательного контура.

Амплитуда силы тока при резонансе. Как и в случае механического резонанса, при резонансе в колебательном контуре создаются оптимальные условия для поступления энергии от внешнего источника в контур. Мощность в контуре максимальна в том случае, когда сила тока совпадает по фазе с напряжением. Здесь наблюдается полная аналогия с механическими колебаниями: при резонансе в механической колебательной системе внешняя сила (аналог напряжения в цепи) совпадает по фазе со скоростью (аналог силы тока).

Не сразу после включения внешнего переменного напряжения в цепи устанавливается резонансное значение силы тока. Амплитуда колебаний силы тока нарастает постепенно — до тех пор, пока энергия, выделяющаяся за период на резисторе, не сравняется с энергией, поступающей в контур за это же время:

$$\frac{I_m^2 R}{2} = \frac{U_m I_m}{2}.$$

Упростив это уравнение, можно записать:

$$I_m R = U_m. \qquad (4.37)$$

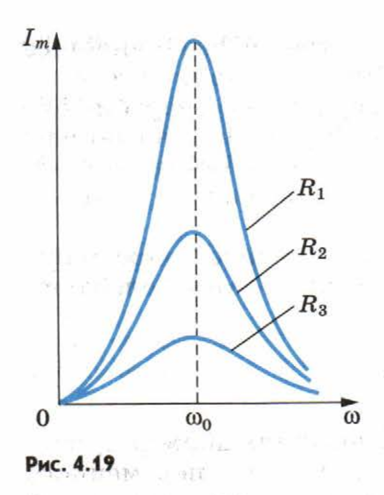


Рис. 4.19

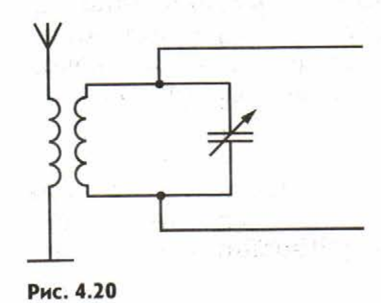
Отсюда амплитуда установившихся колебаний силы тока при резонансе определяется уравнением

$$I_m = \frac{U_m}{R}. \qquad (4.38)$$

При $R \to 0$ резонансное значение силы тока неограниченно возрастает: $(I_m)_{рез} \to \infty$. Наоборот, с увеличением R максимальное значение силы тока уменьшается, и при больших R говорить о резонансе уже не имеет смысла. Зависимость амплитуды силы тока от частоты при различных сопротивлениях ($R_1 < R_2 < R_3$) показана на рисунке 4.19.

Одновременно с увеличением силы тока при резонансе резко возрастают напряжения на конденсаторе и катушке индуктивности. Эти напряжения при малом активном сопротивлении во много раз превышают внешнее напряжение.

Использование резонанса в радиосвязи. Явление электрического резонанса широко используется при осуществлении радиосвязи. Радиоволны от различных передающих станций возбуждают в антенне радиоприемника переменные токи различных частот, так как каждая передающая радиостанция работает на своей частоте. С антенной индуктивно связан колебательный контур (рис. 4.20). Вследствие электромагнитной индукции в контурной катушке возникают переменные ЭДС соответствующих частот и вынужденные колебания силы тока тех же частот. Но только при резонансе колебания силы тока в контуре и напряжения в нем будут значительными, т. е. из колебаний различных частот, возбуждаемых в антенне, контур выделяет только те, частота которых равна его собственной частоте. Настройка контура на нужную частоту ω_0 обычно осуществляется путем изменения емкости конденсатора. В этом обычно состоит настройка радиоприемника на определенную радиостанцию.


Рис. 4.20

Необходимость учета возможности резонанса в электрической цепи. В некоторых случаях резонанс в электрической цепи может принести большой вред. Если цепь не рассчитана на работу в условиях резонанса, то его возникновение может привести к аварии.

Чрезмерно большие токи могут перегреть провода. Большие напряжения приводят к пробою изоляции.

Такого рода аварии нередко случались еще сравнительно недавно, когда плохо представляли себе законы электрических колебаний и не умели правильно рассчитывать электрические цепи.

При вынужденных электромагнитных колебаниях возможен резонанс — резкое возрастание амплитуды колебаний силы тока и напряжения при совпадении частоты внешнего переменного напряжения с собственной частотой колебаний. На явлении резонанса основана вся радиосвязь.



1. **Может ли амплитуда силы тока при резонансе превысить силу постоянного тока в цепи с таким же активным сопротивлением и постоянным напряжением, равным амплитуде переменного напряжения?**
2. **Чему равна разность фаз между колебаниями силы тока и напряжения при резонансе?**
3. **При каком условии резонансные свойства контура выражены наиболее отчетливо?**

§ 36 ГЕНЕРАТОР НА ТРАНЗИСТОРЕ. АВТОКОЛЕБАНИЯ

Вынужденные колебания, которые мы рассматривали до сих пор, возникают под действием переменного напряжения, вырабатываемого генераторами на электростанциях. Такие генераторы не могут создавать колебания высокой частоты, необходимые для радиосвязи. Потребовалась бы чрезмерно большая скорость вращения ротора. Колебания высокой частоты получают с помощью других устройств, например с помощью генератора на транзисторе. Он назван так потому, что одной из основных его частей является полупроводниковый прибор — транзистор.

Автоколебательные системы. Незатухающие вынужденные колебания нередко поддерживаются в цепи действием внешнего периодического напряжения. Но возможны и другие способы получения незатухающих колебаний.

Пусть в системе, в которой могут существовать свободные электромагнитные колебания, имеется источник энергии. Если сама система будет регулировать поступление энергии в колебательный контур для компенсации потерь энергии на резисторе, то в ней могут возникнуть незатухающие колебания.

Системы, в которых генерируются незатухающие колебания за счет поступления энергии от источника внутри самой системы, называются **автоколебательными**. Незатухающие колебания, существующие в системе без воздействия на нее внешних периодических сил, называются **автоколебаниями**.

Генератор на транзисторе — пример автоколебательной системы. Он состоит из колебательного контура с конденсатором емкостью C и катушкой индуктивностью L, источника энергии и транзистора.

Как создать незатухающие колебания в контуре? Известно, что если конденсатор колебательного контура зарядить, то в контуре возникнут затухающие колебания. В конце каждого периода колебаний заряд на пластинах конденсатора имеет меньшее значение, чем в начале периода. Суммарный заряд, конечно, сохраняется (он всегда равен нулю), но происходит уменьшение положительного заряда одной пластины и отрицательного заряда другой на равные по модулю значения. В результате энергия колебаний уменьшается, так как она согласно формуле (4.1) пропорциональна квадрату заряда одной из пластин конденсатора. Чтобы колебания не затухали, нужно компенсировать потери энергии за каждый период.

Пополнять энергию в контуре можно, подзаряжая конденсатор. Для этого надо периодически подключать контур к источнику постоянного напряжения. Конденсатор должен подключаться к источнику только в те интервалы времени, когда присоединенная к положительному полюсу источника пластина заряжена положительно, а присоединенная к отрицательному полюсу — отрицательно (рис. 4.21). Только в этом случае источник будет подзаряжать конденсатор, пополняя его энергию.

Если же ключ замкнуть в момент, когда присоединенная к положительному полюсу источника пластина имеет отрицательный заряд, а присоединенная к отрицательному полюсу — положительный, то конденсатор будет разря-

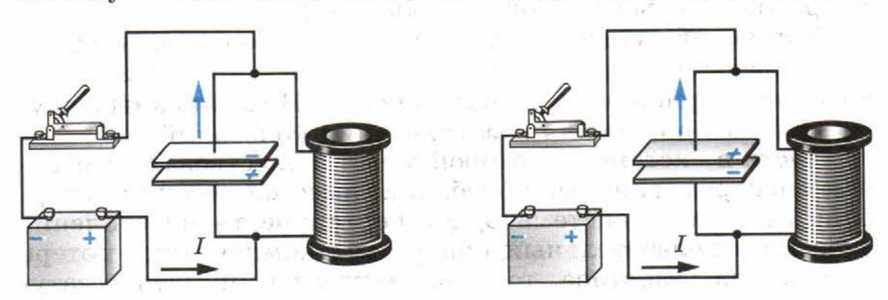


Рис. 4.21

Рис. 4.22

жаться через источник (рис. 4.22). Энергия конденсатора при этом будет убывать.



Рис. 4.23

Следовательно, источник постоянного напряжения, постоянно подключенный к конденсатору контура, не может поддерживать в нем незатухающие колебания, так же как постоянная сила не может поддерживать механические колебания. В течение половины периода энергия поступает в контур, а в течение следующей половины периода возвращается в источник. В контуре незатухающие колебания установятся лишь при условии, что источник будет подключаться к контуру в те интервалы времени, когда возможна передача энергии конденсатору. Для этого необходимо обеспечить автоматическую работу ключа (или *клапана*, как его часто называют). При высокой частоте колебаний ключ должен обладать надежным быстродействием. В качестве такого практически безынерционного ключа и используется транзистор.

Транзистор, напомним, состоит из трех различных полупроводников: эмиттера, базы и коллектора. Эмиттер и коллектор имеют одинаковые основные носители заряда, например дырки (это полупроводник p-типа), а база имеет основные носители противоположного знака, например электроны (полупроводник n-типа). Схематическое изображение транзистора показано на рисунке 4.23.

Работа генератора на транзисторе. Упрощенная схема генератора на транзисторе показана на рисунке 4.24. Колебательный контур соединен последовательно с источником напряжения и транзистором таким образом, что на эмиттер подается положительный потенциал, а на коллектор — отрицательный. При этом переход эмиттер — база (эмиттерный переход) является прямым, а переход база — коллектор (коллекторный переход) оказывается обратным, и ток в цепи не идет. Это соответствует разомкнутому ключу на рисунках 4.21, 4.22.

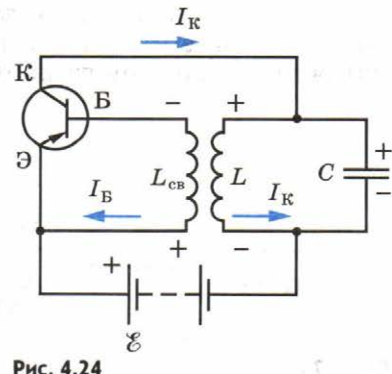


Рис. 4.24

Чтобы в цепи контура возникал ток и подзаряжал конденсатор контура в ходе колебаний, нужно сообщать базе отрицательный относительно эмиттера потенциал, причем в те интервалы времени, когда верхняя (см. рис. 4.24) пла-

стина конденсатора заряжена положительно, а нижняя — отрицательно. Это соответствует замкнутому ключу на рисунке 4.21.

В интервалы времени, когда верхняя пластина конденсатора заряжена отрицательно, а нижняя — положительно, ток в цепи контура должен отсутствовать. Для этого база должна иметь положительный потенциал относительно эмиттера.

Таким образом, для компенсации потерь энергии колебаний в контуре напряжение на эмиттерном переходе должно периодически менять знак в строгом соответствии с колебаниями напряжения на контуре. Необходима, как говорят, *обратная связь*.

Обратная связь в рассматриваемом генераторе — индуктивная. К эмиттерному переходу подключена катушка индуктивностью $L_{св}$, индуктивно связанная с катушкой индуктивностью L контура. Колебания в контуре вследствие электромагнитной индукции возбуждают колебания напряжения на концах катушки, а тем самым и на эмиттерном переходе. Если фаза колебаний напряжения на эмиттерном переходе подобрана правильно, то «толчки» тока в цепи контура действуют на контур в нужные интервалы времени, и колебания не затухают. Напротив, амплитуда колебаний в контуре возрастает до тех пор, пока потери энергии в контуре не станут точно компенсироваться поступлением энергии от источника. Эта амплитуда тем больше, чем больше напряжение источника. Увеличение напряжения приводит к усилению «толчков» тока, подзаряжающего конденсатор.

Генераторы на транзисторах широко применяются не только во многих радиотехнических устройствах: радиоприемниках, передающих радиостанциях, усилителях и т. д., но и в современных электронно-вычислительных машинах.

Основные элементы автоколебательной системы. На примере генератора на транзисторе можно выделить основные элементы, характерные для многих автоколебательных систем (рис. 4.25).

1. Источник энергии, за счет которого поддерживаются незатухающие колебания (в генераторе на транзисторе это источник постоянного напряжения).



Рис. 4.25

2. Колебательная система — та часть автоколебательной системы, непосредственно в которой происходят колебания (в генераторе на транзисторе это колебательный контур).

3. Устройство, регулирующее поступление энергии от источника в колебательную систему, — клапан (в рассмотренном генераторе роль клапана выполняет транзистор).

4. Устройство, обеспечивающее обратную связь, с помощью которой колебательная система управляет клапаном (в генераторе на транзисторе предусмотрена индуктивная связь катушки контура с катушкой в цепи эмиттер — база).

Примеры других автоколебательных систем. Автоколебания возбуждаются не только в электрических системах, но и в механических. К таким системам относятся обычные часы с маятником или балансиром (колесиком с пружинкой, совершающим крутильные колебания). Источником энергии в часах служит потенциальная энергия поднятой гири или сжатой пружины.

К автоколебательным системам относятся электрический звонок с прерывателем, свисток, органные трубы и многое другое. Наше сердце и легкие также можно рассматривать как автоколебательные системы.

Мы ознакомились с наиболее сложным видом колебаний — автоколебаниями. В автоколебательных системах вырабатываются незатухающие колебания различных частот. Без таких систем не было бы ни современной радиосвязи, ни телевидения, ни ЭВМ.



1. **Что такое автоколебательная система?**
2. **В чем отличие автоколебаний от вынужденных и свободных колебаний?**
3. **Опишите свойства *p—n*-перехода в полупроводниках.**
4. **Как устроен транзистор?**
5. **Какова роль транзистора в генерации автоколебаний?**
6. **Как осуществляется обратная связь в генераторе на транзисторе?**
7. **Укажите основные элементы автоколебательной системы.**
8. **Приведите примеры автоколебательных систем, не рассмотренные в тексте.**

* * *

На этом мы заканчиваем изучение механических и электрических колебаний. Замечательна тождественность общего характера процессов различной природы, тождественность математических уравнений, которые их описывают. Эта тождественность, как мы видели, существенно облегчает изучение колебаний.



ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

1. Максимальный заряд на обкладках конденсатора колебательного контура $q_m = 10^{-6}$ Кл. Амплитудное значение силы тока в контуре $I_m = 10^{-3}$ А. Определите период колебаний. (Потерями на нагревание проводников можно пренебречь.)

Решение. Амплитудные значения силы тока и заряда связаны соотношением:

$$I_m = \omega_0 q_m,$$

откуда

$$\omega_0 = \frac{I_m}{q_m}.$$

Следовательно,

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \frac{q_m}{I_m} \approx 6{,}3 \cdot 10^{-3} \text{ (с)}.$$

2. Рамка площадью $S = 3000$ см^2 имеет $N = 200$ витков и вращается в однородном магнитном поле с индукцией $B = 1{,}5 \cdot 10^{-2}$ Тл. Максимальная ЭДС в рамке $\mathscr{E}_m = 1{,}5$ В. Определите время одного оборота.

Решение. Магнитный поток, пронизывающий рамку, равен:

$$\Phi = BSN \cos \omega t.$$

Согласно закону электромагнитной индукции:

$$e = -\Phi' = BSN\omega \sin \omega t.$$

Амплитуда ЭДС индукции

$$\mathscr{E}_m = BSN\omega.$$

Отсюда

$$\omega = \frac{\mathscr{E}_m}{BSN}.$$

Время одного оборота рамки равно:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi BSN}{\mathscr{E}_m} \approx 3{,}8 \text{ (с)}.$$

3. В цепь переменного тока с частотой $\nu = 500$ Гц включена катушка индуктивностью $L = 10$ мГн. Определите емкость конденсатора, который надо включить в эту цепь, чтобы наступил резонанс.

Решение. Электрическая цепь согласно условию задачи представляет собой колебательный контур. Резонанс в

этой цепи наступит, когда частота переменного тока будет равна собственной частоте колебательного контура ($\nu = \nu_0$).

Но

$$\nu_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Отсюда

$$C = \frac{1}{4\pi^2 L\nu^2} \approx 10^{-5}\ \Phi = 10\ \text{мк}\Phi.$$



УПРАЖНЕНИЕ 4

1. После того как конденсатору колебательного контура был сообщен заряд $q = 10^{-5}$ Кл, в контуре возникли затухающие колебания. Какое количество теплоты выделится в контуре к тому времени, когда колебания в нем полностью затухнут? Емкость конденсатора $C = 0{,}01$ мкФ.

2. Колебательный контур состоит из катушки индуктивностью $L = 0{,}003$ Гн и плоского конденсатора емкостью $C = 13{,}4$ пФ. Определите период свободных колебаний в контуре.

3. В каких пределах должна изменяться индуктивность катушки колебательного контура, чтобы частота колебаний изменялась от 400 до 500 Гц? Емкость конденсатора 10 мкФ.

4. Определите амплитуду ЭДС, наводимой в рамке, вращающейся в однородном магнитном поле, если частота вращения составляет 50 об/с, площадь рамки 100 см^2 и магнитная индукция 0,2 Тл.

5. Катушка индуктивностью $L = 0{,}08$ Гн присоединена к источнику переменного напряжения с частотой $\nu = 1000$ Гц. Действующее значение напряжения $U = 100$ В. Определите амплитуду силы тока I_m в цепи.

КРАТКИЕ ИТОГИ ГЛАВЫ 4

1. При электромагнитных колебаниях происходят периодические изменения электрического заряда, силы тока и напряжения. Электромагнитные колебания подразделяются на свободные, затухающие, вынужденные и автоколебания.
2. Простейшей системой, в которой наблюдаются свободные электромагнитные колебания, является колебательный контур. Он состоит из проволочной катушки и конденсатора. Уравнение, описывающее электромагнитные колебания в контуре, имеет вид

$$q'' = -\omega_0^2 q,$$

где q — заряд конденсатора; q'' — вторая производная заряда по времени; $\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$ — квадрат циклической частоты колебаний, зависящей от индуктивности L и емкости C.

3. Решение уравнения, описывающего свободные электромагнитные колебания, выражается либо через косинус, либо через синус:

$$q = q_m \cos \omega_0 t \ \text{ или } \ q = q_m \sin \omega_0 t.$$

4. Колебания, происходящие по закону косинуса или синуса, называются гармоническими. Максимальное значение заряда q_m на обкладках конденсатора называется амплитудой колебаний заряда. Величина ω_0 называется циклической частотой колебаний и выражается через число ν колебаний в секунду: $\omega_0 = 2\pi\nu$.

   Период колебаний выражается через циклическую частоту следующим образом:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC}.$$

   Величину, стоящую под знаком косинуса или синуса в решении для уравнения свободных колебаний, называют фазой колебаний. Фаза определяет состояние колебательной системы в данный момент времени при заданной амплитуде колебаний.

5. Из-за наличия у контура сопротивления колебания в нем с течением времени затухают.

6. Вынужденные колебания, т. е. переменный электрический ток, возникают в цепи под действием внешнего периодического напряжения. Между колебаниями напряжения и силы тока в общем случае наблюдается сдвиг фаз φ.

7. Мощность в цепи переменного тока определяется действующими значениями силы тока и напряжения: $P = IU \cos \varphi$.

8. При совпадении частоты внешнего переменного напряжения с собственной частотой колебательного контура наступает резонанс — резкое возрастание амплитуды силы тока при вынужденных колебаниях. Резонанс выражен отчетливо лишь при достаточно малом активном сопротивлении контура.

   Одновременно с возрастанием силы тока при резонансе происходит резкое увеличение напряжения на конденсаторе и катушке. Явление электрического резонанса используется при радиосвязи.

9. Автоколебания возбуждаются в колебательном контуре генератора на транзисторе за счет энергии источника постоянного напряжения. В генераторе используется транзистор, т. е. полупроводниковое устройство, состоящее из эмиттера, базы и коллектора и имеющее два p—n-перехода. Колебания тока в контуре вызывают колебания напряжения между эмиттером и базой, которые управляют силой тока в цепи колебательного контура (обратная связь). От источника напряжения в контур поступает энергия, компенсирующая потери энергии в контуре на резисторе.

Глава 5. ПРОИЗВОДСТВО, ПЕРЕДАЧА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Электрическая энергия обладает неоспоримыми преимуществами перед всеми другими видами энергии. Ее можно передавать по проводам на огромные расстояния со сравнительно малыми потерями и удобно распределять между потребителями. Главное же в том, что эту энергию с помощью достаточно простых устройств легко превратить в любые другие формы: механическую, внутреннюю (нагревание тел), энергию света и т. д.

Переменный ток в отличие от постоянного имеет то преимущество, что напряжение и силу тока можно в очень широких пределах преобразовывать (трансформировать) почти без потерь энергии. Такие преобразования необходимы во многих электро- и радиотехнических устройствах. Но особенно необходима трансформация напряжения и тока при передаче электроэнергии на большие расстояния.

§ 37 ГЕНЕРИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Электрический ток вырабатывается в генераторах — устройствах, преобразующих энергию того или иного вида в электрическую энергию. К генераторам относятся гальванические элементы, электростатические машины, термобатареи[1], солнечные батареи и т. п. Исследуются возможно-

[1] В термобатареях используется свойство двух контактов разнородных материалов создавать ЭДС за счет разности температур контактов.

сти создания принципиально новых типов генераторов. Например, разрабатываются так называемые топливные элементы, в которых энергия, освобождающаяся в результате реакции водорода с кислородом, непосредственно превращается в электрическую.

Область применения каждого из перечисленных типов генераторов электроэнергии определяется их характеристиками. Так, электростатические машины создают высокую разность потенциалов, но не способны создать в цепи сколько-нибудь значительную силу тока. Гальванические элементы могут дать большой ток, но продолжительность их действия невелика.

Основную роль в наше время выполняют *электромеханические индукционные генераторы переменного тока*. В этих генераторах механическая энергия превращается в электрическую. Их действие основано на явлении электромагнитной индукции. Такие генераторы имеют сравнительно простое устройство и позволяют получать большие токи при достаточно высоком напряжении.

В дальнейшем, говоря о генераторах, мы будем иметь в виду именно индукционные электромеханические генераторы.

Генератор переменного тока. Принцип действия генератора переменного тока уже был рассмотрен в § 31.

В настоящее время имеется много различных типов индукционных генераторов. Но все они состоят из одних и тех же основных частей. Это, во-первых, электромагнит или постоянный магнит, создающий магнитное поле, и, во-вторых, обмотка, в которой индуцируется переменная ЭДС (в рассмотренной модели генератора это вращающаяся рамка). Так как ЭДС, наводимые в последовательно соединенных витках, складываются, то амплитуда ЭДС индукции в рамке пропорциональна числу ее витков. Она пропорциональна также амплитуде переменного магнитного потока ($\Phi_m = BS$) через каждый виток (см. § 31).

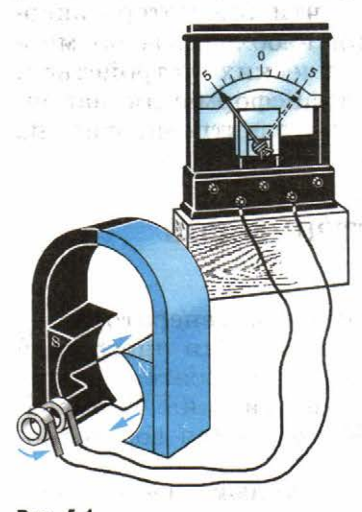


Рис. 5.1

Для получения большого магнитного потока в генераторах применяют специальную магнитную систему, состоящую из двух сердечников, изготовленных из электротехнической стали. Обмотки, создающие магнитное поле,

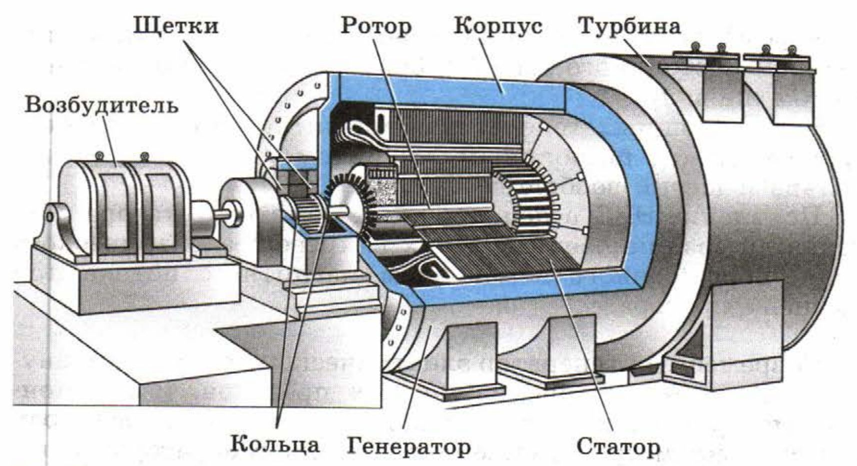


Рис. 5.2

размещены в пазах одного из сердечников, а обмотки, в которых индуцируется ЭДС, — в пазах другого. Один из сердечников (обычно внутренний) вместе с обмоткой вращают вокруг горизонтальной или вертикальной оси. Поэтому он называется *ротором*. Неподвижный сердечник с обмоткой называют *статором*. Зазор между сердечниками статора и ротора делают как можно меньшим для увеличения потока вектора магнитной индукции.

В изображенной на рисунке 5.1 модели генератора вращают проволочную рамку, которая является ротором (но без железного сердечника). Магнитное поле создает неподвижный постоянный магнит. Разумеется, можно было бы поступить и наоборот: вращать магнит, а рамку оставить неподвижной.

В больших промышленных генераторах вращается именно электромагнит, являющийся ротором, а обмотки, в которых наводится ЭДС, уложены в пазах статора и остаются неподвижными. Дело в том, что подводить ток к ротору или отводить его из обмотки ротора во внешнюю цепь приходится при помощи скользящих контактов. Для этого ротор снабжается *контактными кольцами*, присоединенными к концам его обмотки (рис. 5.2). Неподвижные пластины — *щетки* — прижаты к кольцам и осуществляют связь обмотки ротора с внешней цепью. Сила тока в обмотках электромагнита, создающего магнитное поле, значительно меньше силы тока, отдаваемого генератором во внешнюю цепь. Поэтому генерируемый ток удобнее снимать с неподвижных обмоток, а через скользящие контакты подводить сравнительно слабый ток к вращающемуся

электромагниту. Этот ток вырабатывается отдельным генератором постоянного тока (возбудителем), расположенным на том же валу.

В маломощных генераторах магнитное поле создается вращающимся постоянным магнитом. В таком случае кольца и щетки вообще не нужны.

Появление ЭДС в неподвижных обмотках статора объясняется возникновением в них вихревого электрического поля, порожденного изменением магнитного потока при вращении ротора.

Современный генератор электрического тока — это внушительное сооружение из медных проводов, изоляционных материалов и стальных конструкций. При размерах в несколько метров важнейшие детали генераторов изготовляются с точностью до миллиметра. Нигде в природе нет такого сочетания движущихся частей, которые могли бы порождать электрическую энергию столь же непрерывно и экономично.



1. **Какими преимуществами обладает переменный ток по сравнению с постоянным?**
2. **На каком принципе основана работа генераторов переменного тока?**

§ 38 ТРАНСФОРМАТОРЫ

Электрический ток никогда не получил бы такого широкого применения, если бы его нельзя было преобразовывать почти без потерь энергии.

Назначение трансформаторов. ЭДС мощных генераторов электростанций довольно велика. Между тем в практике чаще всего нужно не слишком высокое напряжение.

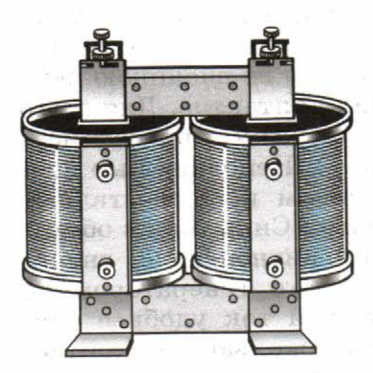
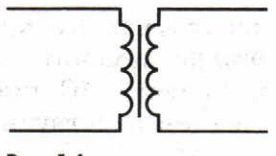


Рис. 5.3

Преобразование переменного тока, при котором напряжение увеличивается или уменьшается в несколько раз практически без потери мощности, осуществляется с помощью *трансформаторов*.

Впервые трансформаторы были использованы в 1878 г. русским ученым П. Н. Яблочковым для питания изобретенных им электрических свечей — нового в то время источника света.


Рис. 5.4

Устройство трансформатора. Трансформатор состоит из замкнутого стального сердечника, собранного из пластин, на который надеты две (иногда и более) катушки с проволочными обмотками (рис. 5.3). Одна из обмоток, называемая *первичной*, подключается к источнику переменного напряжения. Другая обмотка, к которой присоединяют нагрузку, т. е. приборы и устройства, потребляющие электроэнергию, называется *вторичной*. Условное обозначение трансформатора приведено на рисунке 5.4.

Трансформатор на холостом ходу. Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. При прохождении переменного тока по первичной обмотке в сердечнике появляется переменный магнитный поток, которым возбуждается ЭДС индукции в витках каждой обмотки. Сердечник из трансформаторной стали концентрирует магнитное поле, так что магнитный поток существует практически только внутри сердечника и одинаков во всех его сечениях.

Мгновенное значение ЭДС индукции e во всех витках первичной или вторичной обмотки одинаково. Согласно закону Фарадея оно определяется формулой

$$e = -\Phi', \tag{5.1}$$

где Φ' — производная потока магнитной индукции по времени.

В первичной обмотке, имеющей N_1 витков, полная ЭДС индукции e_1 равна $N_1 e$. Во вторичной обмотке полная ЭДС индукции e_2 равна $N_2 e$ (N_2 — число витков этой обмотки). Отсюда следует, что

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2}. \tag{5.2}$$

Обычно активное сопротивление обмоток трансформатора мало, и им можно пренебречь. В этом случае модуль напряжения на зажимах первичной обмотки примерно равен модулю суммарной ЭДС индукции:

$$|u_1| \approx |e_1|. \tag{5.3}$$

При разомкнутой вторичной обмотке трансформатора ток в ней не идет, и имеет место соотношение

$$|u_2| = |e_2|. \tag{5.4}$$

Мгновенные значения ЭДС e_1 и e_2 изменяются синфазно (одновременно достигают максимума и одновременно про-

ходят через нуль). Поэтому их отношение в формуле (5.2) можно заменить отношением действующих значений $\mathscr{E}_1$ и $\mathscr{E}_2$ этих ЭДС или, учитывая равенства (5.3) и (5.4), отношением действующих значений напряжений U_1 и U_2:

$$\frac{\mathscr{E}_1}{\mathscr{E}_2} \approx \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{N_1}{N_2} = K. \qquad (5.5)$$

Величина K называется **коэффициентом трансформации.** Он равен отношению напряжений в первичной и вторичной обмотках трансформатора. При $K > 1$ трансформатор является понижающим, а при $K < 1$ — повышающим.

Работа нагруженного трансформатора. Если к концам вторичной обмотки присоединить цепь, потребляющую электроэнергию, или, как говорят, нагрузить трансформатор, то сила тока во вторичной обмотке уже не будет равна нулю. Появившийся ток создаст в сердечнике свой переменный магнитный поток, который будет уменьшать изменения магнитного потока в сердечнике.

Уменьшение амплитуды колебаний результирующего магнитного потока, казалось бы должно, в свою очередь, уменьшить ЭДС индукции в первичной обмотке. Это, однако, не произойдет, так как согласно формуле (5.3) $|u_1| \approx |e_1|$. Поэтому при замыкании цепи вторичной обмотки автоматически увеличится сила тока в первичной обмотке. Его амплитуда возрастет таким образом, что восстановится прежнее значение амплитуды колебаний результирующего магнитного потока.

Увеличение силы тока в цепи первичной обмотки происходит в соответствии с законом сохранения энергии: отдача электроэнергии в цепь, присоединенную к вторичной обмотке трансформатора, сопровождается потреблением от сети такой же энергии первичной обмоткой. Мощность в первичной цепи при нагрузке трансформатора, близкой к номинальной, примерно равна мощности во вторичной цепи:

$$U_1 I_1 \approx U_2 I_2, \qquad (5.6)$$

отсюда

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}. \qquad (5.7)$$

Это означает, что, повышая с помощью трансформатора напряжение в несколько раз, мы во столько же раз уменьшаем силу тока (и наоборот).

Трансформатор преобразует переменный электрический ток таким образом, что произведение силы тока на напряжение примерно одинаково в первичной и вторичной обмотках.



1. Что такое коэффициент трансформации?
2. Что понижает или повышает трансформатор?

§ 39 ПРОИЗВОДСТВО И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

В наше время уровень производства и потребления энергии — один из важнейших показателей развития производственных сил общества. Ведущую роль при этом играет электроэнергия — самая универсальная и удобная для использования форма энергии. Если потребление энергии в мире увеличивается в 2 раза примерно за 25 лет, то увеличение потребления электроэнергии в 2 раза происходит в среднем за 10 лет. Это означает, что все больше и больше процессов, связанных с расходованием энергоресурсов, переводится на электроэнергию.

Производство электроэнергии. Производится электроэнергия на больших и малых электрических станциях в основном с помощью электромеханических индукционных генераторов. Существует два основных типа электростанций: тепловые и гидроэлектрические. Различаются эти электростанции двигателями, вращающими роторы генераторов.

На *тепловых электростанциях* источником энергии является топливо: уголь, газ, нефть, мазут, горючие сланцы. Роторы электрических генераторов приводятся во вращение паровыми и газовыми турбинами или двигателями внутреннего сгорания. Наиболее экономичны крупные тепловые паротурбинные электростанции (сокращенно: ТЭС). Большинство ТЭС нашей страны использует в качестве топлива угольную пыль. Для выработки 1 кВт · ч электроэнергии затрачивается несколько сот граммов угля. В паровом котле свыше 90% выделяемой топливом энергии передается пару. В турбине кинетическая энергия струй пара передается ротору. Вал турбины жестко соединен с валом генератора. Паровые турбогенераторы весьма быстроходны: число оборотов ротора составляет несколько тысяч в минуту.

Из курса физики 10 класса известно, что КПД тепловых двигателей увеличивается с повышением температуры нагревателя и соответственно начальной температуры рабочего тела (пара, газа). Поэтому поступающий в турбину пар доводят до высоких параметров: температуру — почти до 550 °С и давление — до 25 МПа. Коэффициент полезного действия ТЭС достигает 40%. Бо́льшая часть энергии теряется вместе с горячим отработанным паром. Превращения энергии показаны на схеме, приведенной на рисунке 5.5.

Тепловые электростанции — так называемые теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) — позволяют значительную часть энергии отработанного пара использовать на промышленных предприятиях и для бытовых нужд (для отопления и горячего водоснабжения). В результате КПД ТЭЦ достигает 60—70%. В настоящее время в России ТЭЦ дают около 40% всей электроэнергии и снабжают электроэнергией и теплом сотни городов.

На *гидроэлектростанциях* (ГЭС) для вращения роторов генераторов используется потенциальная энергия воды. Роторы электрических генераторов приводятся во вращение гидравлическими турбинами. Мощность такой станции зависит от создаваемой плотиной разности уровней воды (напор) и от массы воды, проходящей через турбину в каждую секунду (расход воды). Превращения энергии показаны на схеме, приведенной на рисунке 5.6.

Гидроэлектростанции дают около 20% всей вырабатываемой в нашей стране электроэнергии.

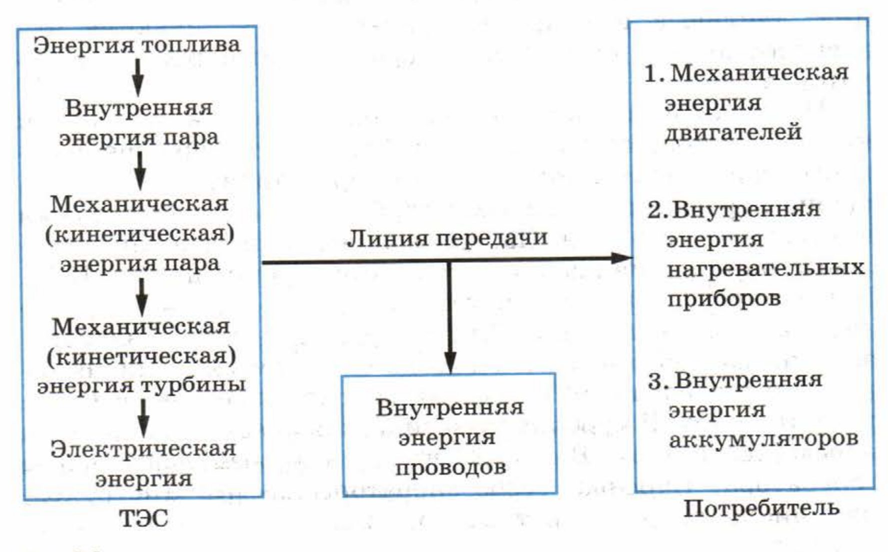


Рис. 5.5

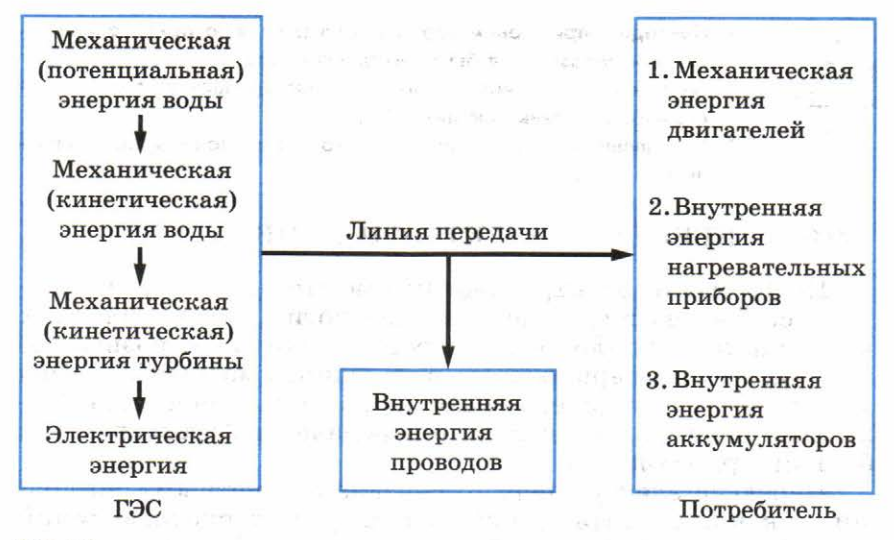


Рис. 5.6

Значительную роль в энергетике играют атомные электростанции (АЭС). В настоящее время АЭС в России дают около 10% электроэнергии.

Использование электроэнергии. Главным потребителем электроэнергии является промышленность, на долю которой приходится около 70% производимой электроэнергии. Крупным потребителем является также транспорт. Все большее количество железнодорожных линий переводится на электрическую тягу. Почти все деревни и села получают электроэнергию от электростанций для производственных и бытовых нужд. О применении электроэнергии для освещения жилищ и в бытовых электроприборах знает каждый.

Бóльшая часть используемой электроэнергии сейчас превращается в механическую энергию. Почти все механизмы в промышленности приводятся в движение электрическими двигателями. Они удобны, компактны, допускают возможность автоматизации производства.

Около трети электроэнергии, потребляемой промышленностью, используется для технологических целей (электросварка, электрический нагрев и плавление металлов, электролиз и т. п.).

Современная цивилизация немыслима без широкого использования электроэнергии. Нарушение снабжения электроэнергией большого города при аварии парализует его жизнь.



1. **Приведите примеры машин и механизмов, в которых совершенно не использовался бы электрический ток!**
2. **Находились ли вы возле генератора электрического тока на расстоянии, не превышающем 100 м!**
3. **Чего лишились бы жители большого города при аварии электрической сети!**

§ 40 ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Потребители электроэнергии имеются повсюду. Производится же она в сравнительно немногих местах, близких к источникам топливо- и гидроресурсов. Электроэнергию не удается консервировать в больших масштабах. Она должна быть потреблена сразу же после получения. Поэтому возникает необходимость в передаче электроэнергии на большие расстояния.

Передача электроэнергии связана с заметными потерями, так как электрический ток нагревает провода линий электропередачи. В соответствии с законом Джоуля — Ленца энергия, расходуемая на нагрев проводов линии, определяется формулой

$$Q = I^2 Rt = \frac{P^2}{U^2} Rt,$$

где R — сопротивление линии, U — передаваемое напряжение, P — мощность источника тока.

При очень большой длине линии передача энергии может стать экономически невыгодной. Значительно снизить сопротивление линии R практически весьма трудно. Поэтому приходится уменьшать силу тока I.

Так как мощность источника тока P равна произведению силы тока I на напряжение U, то для уменьшения передаваемой мощности нужно повысить передаваемое напряжение в линии передачи.

Поэтому на крупных электростанциях устанавливают *повышающие трансформаторы*. Трансформатор увеличивает напряжение в линии во столько же раз, во сколько раз уменьшает силу тока.

Чем длиннее линия передачи, тем выгоднее использовать более высокое напряжение. Так, в высоковольтной линии передачи Волжская ГЭС — Москва и некоторых других используют напряжение 500 кВ. Между тем генераторы переменного тока настраивают на напряжения, не превышающие 16—20 кВ. Более высокое напряжение потребовало бы принятия сложных специальных мер для изоляции обмоток и других частей генераторов.

Для непосредственного использования электроэнергии в двигателях электропривода станков, в осветительной сети и для других целей напряжение на концах линии

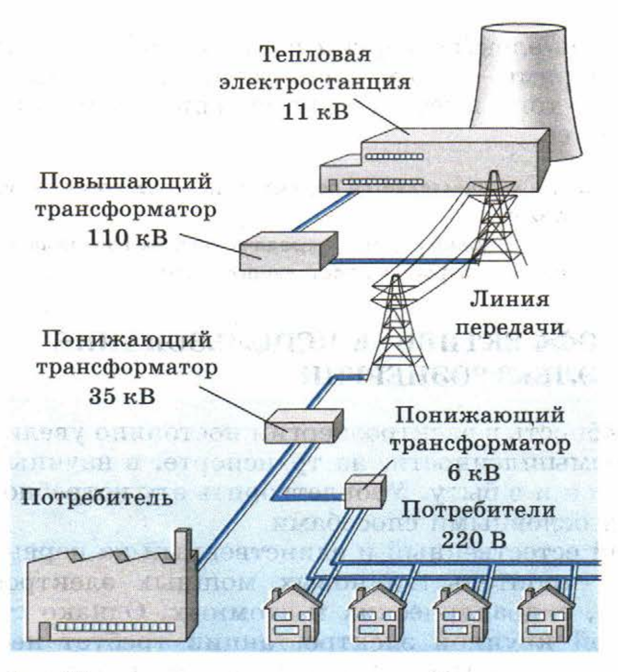


Рис. 5.7

нужно понизить. Это достигается с помощью *понижающих трансформаторов*. Общая схема передачи энергии и ее распределения показана на рисунке 5.7.

Обычно понижение напряжения и соответственно увеличение силы тока осуществляются в несколько этапов. На каждом этапе напряжение становится все меньше, а территория, охватываемая электрической сетью, — все шире.

При очень высоком напряжении между проводами может начаться разряд, приводящий к потерям энергии. Допустимая амплитуда переменного напряжения должна быть такой, чтобы при заданной площади поперечного сечения провода потери энергии вследствие разряда были незначительными.

Электрические станции ряда районов страны объединены высоковольтными линиями электропередачи, образуя общую электрическую сеть, к которой подключены потребители. Такое объединение, называемое *энергосистемой*, дает возможность сгладить пиковые нагрузки потребления энергии в утренние и вечерние часы. Энергосистема обеспечивает бесперебойность подачи энергии потребителям вне зависимости от места их расположения. Сейчас почти вся территория нашей страны обеспечивается электроэнергией объединенными энергетическими системами. Действует Единая энергетическая система европейской части страны.

Передача электроэнергии на большие расстояния с малыми потерями — сложная задача. Использование электрического тока высокого напряжения помогает успешно разрешить ее.



1. Как осуществляется передача электроэнергии на большие расстояния?
2. В чем преимущества передачи энергии на большие расстояния при использовании постоянного тока?

§ 41 ЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Потребность в электроэнергии постоянно увеличивается как в промышленности, на транспорте, в научных учреждениях, так и в быту. Удовлетворить эту потребность можно двумя основными способами.

Самый естественный и единственный на первый взгляд способ — строительство новых мощных электростанций: тепловых, гидравлических и атомных. Однако строительство новой крупной электростанции требует нескольких лет и больших затрат. Важно и то, что тепловые электростанции потребляют невозобновляемые природные ресурсы: уголь, нефть и газ. Одновременно они наносят большой ущерб экологическому равновесию на нашей планете.

Передовые технологии позволяют удовлетворить потребности в электроэнергии другим способом.

Возможности для более эффективного использования электроэнергии имеются, и немалые. Одна из них связана с освещением, на которое расходуется около 25% всей производимой электроэнергии. В настоящее время в США и других странах используются компактные люминесцентные лампы, которые потребляют на 80% меньше электроэнергии, чем лампы накаливания. Стоимость таких ламп значительно превышает стоимость обычных, но окупаются они быстро. Наряду с этим и самые простые меры по экономному применению освещения в домах и производственных помещениях способны дать немалый эффект. Не надо оставлять напрасно включенными лампы, необходимо позаботиться о том, чтобы освещались лишь рабочие участки и т. д.

Имеется и множество других возможностей повышения эффективности использования электроэнергии в быту: в холодильных установках, телевизорах, компьютерах и т. д. Сэкономленные средства можно использовать для разработки устройств, преобразующих солнечную энергию в электрическую. Большие надежды возлагаются сейчас на получение энергии с помощью управляемых термоядерных

реакций. Такие устройства не будут представлять столь большой опасности, как обычные атомные электростанции.

Приоритет должен быть отдан увеличению эффективности использования электроэнергии, а не повышению мощности электростанций. Кроме этого необходимо разрабатывать новые устройства для получения энергии.



УПРАЖНЕНИЕ 5

1. Как должны быть расположены изолированные друг от друга стальные пластины сердечника ротора индукционного генератора для уменьшения вихревых токов?

2. Обмотки трансформатора сделаны из провода разной толщины. Какая из обмоток содержит большее число витков?

3. Как определить число витков обмотки трансформатора, не разматывая катушку?

4. Что может произойти, если случайно подключить трансформатор к источнику постоянного тока?

5. Человеческий глаз может фиксировать изменение интенсивности излучения с частотой не более 20 Гц. По цепи лампы накаливания идет переменный ток. Почему мы видим постоянное, а не пульсирующее излучение лампы?

КРАТКИЕ ИТОГИ ГЛАВЫ 5

1. Электрический ток вырабатывается преимущественно электромеханическими индукционными генераторами. Эти генераторы превращают механическую энергию в энергию электрического тока.
2. Переменный электрический ток преобразуется с помощью трансформаторов. Трансформатор имеет две обмотки, надетые на стальной сердечник. Он используется для увеличения или уменьшения напряжения при минимальных потерях энергии. Получаемое с его помощью изменение напряжения определяется отношением числа витков N_1 в первичной обмотке к числу витков N_2 во вторичной обмотке:
$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}.$$
3. Во сколько раз увеличивается (уменьшается) напряжение, во столько же (примерно) раз уменьшается (увеличивается) сила тока:
$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}.$$

4. Потери электроэнергии в проводниках обратно пропорциональны квадрату напряжения на них. Поэтому передачу электрической энергии по проводам выгодно осуществлять при высоком напряжении. Трансформаторы на электростанциях повышают напряжение перед передачей энергии на большие расстояния. На конце линии электропередачи напряжение понижают с помощью трансформаторов, и электрический ток поступает к потребителям.

Глава 6. МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ

В этой главе рассмотрим свойства механических волн.

§ 42 ВОЛНОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Каждый из нас наблюдал, как от камня, брошенного на спокойную поверхность пруда или озера, кругами разбегаются волны (рис. 6.1). Многие следили за морскими волнами, набегающими на берег. Все читали рассказы о морских путешествиях, о чудовищной силе морских волн, легко раскачивающих большие корабли. Однако при наблюдении этих явлений не всем известно, что звук всплеска воды доносится до нашего уха волнами в том воздухе, которым мы дышим, что свет, с помощью которого мы зрительно воспринимаем окружающее, тоже представляет собой волновое движение.

Волновые процессы чрезвычайно широко распространены в природе. Различны физические причины, вызывающие волновые движения. Но, подобно колебаниям, все виды волн описываются количественно одинаковыми или почти одинаковыми законами. Многие трудные для понимания вопросы становятся более ясными, если сравнивать различные волновые явления.

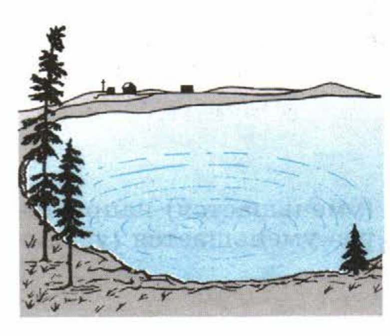


Рис. 6.1

Что же называют волной? Почему возникают волны? Отдельные частицы любого тела — твердого, жидкого или газообразного — взаимодействуют друг с другом. Поэтому если какая-либо частица тела начинает совершать колебательные движения, то в результате взаимодействия между частицами это движение начинает с некоторой скоростью распространяться во все стороны.

Волна — это колебания, распространяющиеся в пространстве с течением времени.

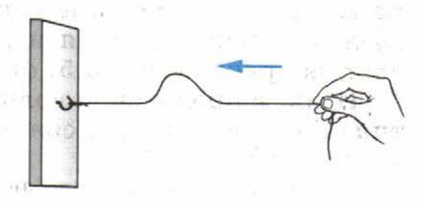
В воздухе, твердых телах и внутри жидкостей механические волны возникают благодаря действию сил упругости. Эти силы осуществляют связь между отдельными частями тела. Образование волн на поверхности воды вызывают сила тяжести и сила поверхностного натяжения.

Наиболее отчетливо главные особенности волнового движения можно увидеть, если рассматривать волны на поверхности воды. Это могут быть, например, волны, которые представляют собой бегущие вперед округлые валы. Расстояния между валами, или гребнями, примерно одинаковы. Однако если на поверхности воды, по которой бежит волна, находится легкий предмет, например лист с дерева, то он не будет увлекаться вперед волной, а начнет совершать колебания вверх и вниз, оставаясь почти на одном месте.

При возбуждении волны происходит процесс распространения колебаний, но не перенос вещества. Возникшие в каком-то месте колебания воды, например от брошенного камня, передаются соседним участкам и постепенно распространяются во все стороны, вовлекая в колебательные движения все новые и новые частицы среды. Течение же воды не возникает, перемещаются лишь локальные формы ее поверхности.

Скорость волны. Важнейшей характеристикой волны является скорость ее распространения. Волны любой природы не распространяются в пространстве мгновенно. Их скорость *конечна*. Можно себе, например, представить, что над морем летит чайка, причем так, что она все время оказывается над одним и тем же гребнем волны. Скорость волны в этом случае равна скорости чайки. Волны на поверхности воды удобны для наблюдения, так как скорость их распространения сравнительно невелика.

Поперечные и продольные волны. Нетрудно также наблюдать волны, распространяющиеся вдоль резинового шнура. Если один конец шнура закрепить и, слегка натянув шнур рукой, привести другой его конец в колебательное движение, то по шнуру побежит волна (рис. 6.2). Скорость волны будет тем больше, чем сильнее натянут шнур. Волна добежит до точки закрепления шнура, отразится и побежит назад. В этом опыте при распространении волны происходят изменения формы шнура. Каждый участок шнура колеблется относительно своего неизменного положения равнове-


Рис. 6.2

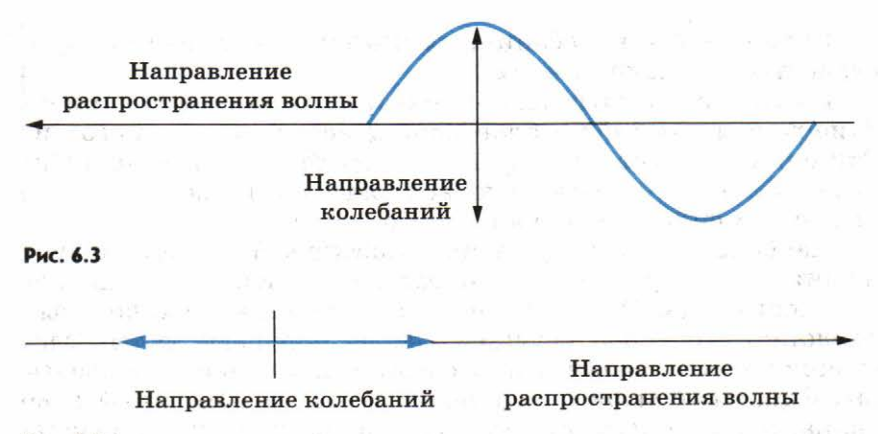


Рис. 6.3

Рис. 6.4

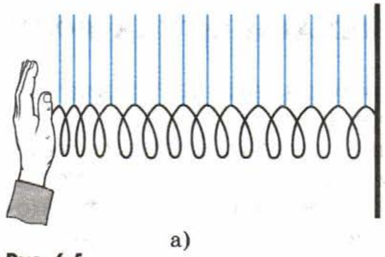
сия. Обратим внимание на то, что *при распространении волны вдоль шнура колебания совершаются в направлении, перпендикулярном направлению распространения волны*. Такие волны называются **поперечными** (рис. 6.3). В поперечной волне смещения отдельных участков среды происходят в направлении, перпендикулярном направлению распространения волны. При этом возникает упругая деформация, называемая **деформацией сдвига**. Отдельные слои вещества сдвигаются относительно друг друга. При деформации сдвига в твердом теле возникают силы упругости, стремящиеся вернуть тело в исходное состояние. Именно силы упругости и вызывают колебания частиц среды[1].

Сдвиг слоев относительно друг друга в газах и жидкостях не приводит к появлению сил упругости. Поэтому в газах и жидкостях не могут существовать поперечные волны. Поперечные волны возникают *в твердых телах*.

Но *колебания частиц среды могут происходить и вдоль направления распространения волны* (рис. 6.4). Такая волна называется **продольной**. Продольную волну удобно наблюдать на длинной мягкой пружине большого диаметра. Ударив ладонью по одному из концов пружины (рис. 6.5, *а*), можно заметить, как сжатие (упругий импульс) бежит по пружине. С помощью серии последовательных ударов можно возбудить в пружине волну, представляющую собой последовательные сжатия и растяжения пружины, бегущие друг за другом (рис. 6.5, *б*).

Итак, в продольной волне происходит **деформация сжатия**. Силы упругости, связанные с этой деформацией, воз-

[1] Когда мы говорим о колебаниях частиц среды, то имеем в виду колебания малых объемов среды, а не колебания молекул.


а)

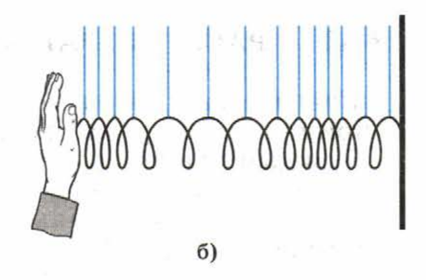

б)

Рис. 6.5

никают как в твердых телах, так и в жидкостях и газах. Эти силы вызывают колебания отдельных участков среды. Поэтому продольные волны могут распространяться во всех упругих средах. В твердых телах скорость продольных волн больше скорости поперечных.

Это учитывается при определении расстояния от очага землетрясения до сейсмической станции. Вначале на станции регистрируется продольная волна, так как ее скорость в земной коре больше, чем поперечной. Спустя некоторое время регистрируется поперечная волна, возбуждаемая при землетрясении одновременно с продольной. Зная скорости продольных и поперечных волн в земной коре и время запаздывания поперечной волны, можно определить расстояние до очага землетрясения.

Энергия волны. При распространении механической волны движение передается от одних частиц среды к другим. С передачей движения связана передача энергии. Основное свойство всех волн независимо от их природы состоит в переносе ими энергии без переноса вещества. Энергия поступает от источника, возбуждающего колебания начала шнура, струны и т. д., и распространяется вместе с волной. Через любое поперечное сечение, например шнура, передается энергия. Эта энергия слагается из кинетической энергии движения частиц среды и потенциальной энергии их упругой деформации. Постепенное уменьшение амплитуды колебаний частиц при распространении волны связано с превращением части механической энергии во внутреннюю.

Волна — это колебания, распространяющиеся в пространстве с течением времени. Скорость волны конечна. Волна переносит энергию, но не переносит вещество среды.



1. **Какие волны называются поперечными, а какие продольными?**
2. **Может ли в воде распространяться поперечная волна?**

§ 43 РАСПРОСТРАНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЛН

Сначала рассмотрим *волну*, которая распространяется, например, вдоль резинового шнура (см. рис. 6.2).

Каждый участок шнура обладает массой и упругостью. При деформации шнура в любом его сечении появляются силы упругости. Эти силы стремятся возвратить шнур в исходное положение. За счет инертности участок колеблющегося шнура не останавливается в положении равновесия, а проходит его, продолжая двигаться до тех пор, пока силы упругости не остановят этот участок. Это будет в момент максимального отклонения от положения равновесия.

Вместо шнура возьмем теперь цепочку одинаковых металлических шаров, подвешенных на нитях. Шары связаны между собой пружинками (рис. 6.6). Масса пружинок много меньше массы шаров. В этой модели инертные и упругие свойства разделены: масса сосредоточена в основном в шарах, а упругость — в пружинках. Это разделение несущественно при рассмотрении волнового движения.

Если отклонить левый крайний шар в горизонтальной плоскости перпендикулярно всей цепочке шаров, то прикрепленная к нему пружинка будет деформирована, и на 2-й шар начнет действовать сила, заставляя его отклоняться в ту же сторону, куда отклонен 1-й шар. Вследствие инертности движение 2-го шара не будет происходить синхронно с 1-м. Его движение, повторяющее движение 1-го шара, будет запаздывать по времени.

Если 1-й шар заставить колебаться с периодом T (рукой или с помощью какого-либо механизма), то 2-й шар тоже придет в колебательное движение вслед за 1-м, причем с той же частотой, но с некоторым отставанием по фазе. Шар 3-й под действием силы упругости, вызванной смещением 2-го шара, тоже начнет колебаться, еще более отставая по фазе от первого, и т. д. Наконец, все шары станут совершать вынужденные колебания с одной и той же частотой, но с различными фазами. При этом вдоль цепочки шаров побежит поперечная волна.

На рисунке 6.7, *а—е* изображен процесс распространения волны. Показаны положения шаров в последовательные моменты времени, отстоящие друг от друга на четверть периода колебаний (вид сверху). Стрелки у шаров — это векторы скоростей их движения в соответствующие моменты времени.

На модели упругого тела в виде цепочки массивных шаров, связанных пружинками (рис. 6.8, *а*), можно наблюдать также и процесс распространения продольных волн. Шары подвешены в этот раз так, чтобы они могли коле-

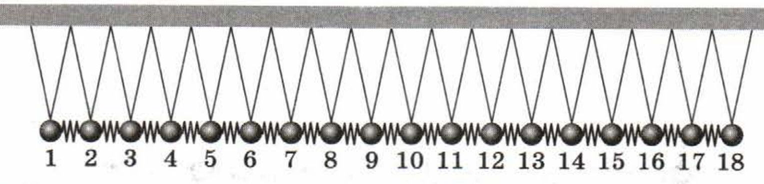


Рис. 6.6

Рис. 6.7

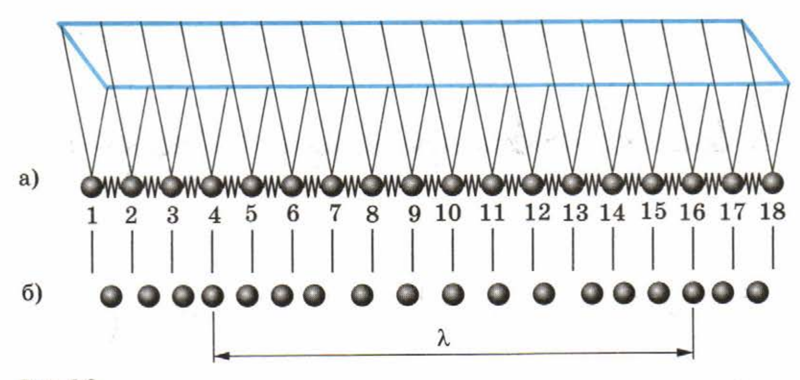


Рис. 6.8

баться только *вдоль цепочки*. Если 1-й шар привести в колебательное движение с периодом T, то вдоль цепочки побежит продольная волна, состоящая из чередующихся уплотнений и разрежений шаров (рис. 6.8, *б*). Этот рисунок соответствует рисунку 6.7, *е* для случая распространения поперечной волны.

Распространение продольных и поперечных волн можно проанализировать с помощью модели, состоящей из цепочки шаров, связанных пружинками.



1. **На какое расстояние распространяется волна за время $t = T/4$ (см. рис. 6.7)?**
2. **Что определяет амплитуду колебаний шаров в рассмотренной модели?**

§ 44 ДЛИНА ВОЛНЫ. СКОРОСТЬ ВОЛНЫ

Рассмотрим физические характеристики волны — длину волны и скорость. После того как колебания при распространении поперечной волны достигнут 13-го шара, 1-й и 13-й шары будут колебаться совершенно одинаково. Когда 1-й шар находится в положении равновесия и движется влево (если смотреть вдоль цепочки шаров; см. рис. 6.7, *д*), то и 13-й шар находится в положении равновесия и тоже движется влево. Спустя еще четверть периода 1-й шар оказывается максимально отклоненным влево и в таком же положении находится 13-й шар (см. рис. 6.7, *е*). Колебания этих шаров происходят в одинаковых фазах[1].

[1] Точнее, колебания 13-го шара отстают по фазе от колебаний 1-го шара на 2π. Но так как $\cos(\omega t - 2\pi) = \cos \omega t$, то такая разность фаз не приводит к различию в состояниях колеблющихся шаров, и можно считать поэтому, что их колебания происходят в одинаковых фазах.

Кратчайшее расстояние между точками, колеблющимися в одинаковых фазах, называется **длиной волны.** Следовательно, расстояния между 1-м и 13-м, 2-м и 14-м, 3-м и 15-м шарами равны длине волны (см. рис. 6.7, *д*, *е*). Длина волны обозначается греческой буквой λ (лямбда).

Длина продольной волны согласно рисунку 6.8, *б* равна расстоянию между 4-м и 16-м шарами или между 2-м и 14-м шарами.

При распространении волны разные частицы среды (шары в рассматриваемой модели) колеблются с различными фазами, если только расстояние между ними не равно $n\lambda$ (где n — целое число).

Шары 1-й и 7-й (см. рис. 6.7), находящиеся на расстоянии $\lambda/2$, колеблются в противоположных фазах: когда 1-й шар от положения равновесия движется вверх, то 7-й — вниз (см. рис. 6.7, *д*).

За один период волна распространяется на расстояние λ (см. рис. 6.7, *д*).

$$\lambda = vT. \qquad (6.1)$$

Длина волны — это расстояние, на которое распространяется волна за время, равное одному периоду колебаний.

Так как период T и частота ν связаны соотношением

$$T = \frac{1}{\nu},$$

то

$$\lambda = \frac{v}{\nu}$$

и, соответственно,

$$v = \lambda\nu. \qquad (6.2)$$

При распространении волны вдоль шнура мы наблюдаем два вида периодичности.

Во-первых, каждая частица шнура совершает периодические колебания во времени. В случае гармонических колебаний (эти колебания происходят по закону синуса или косинуса) частота и амплитуда колебаний частиц одинаковы во всех точках шнура. Эти колебания различаются только фазами.

Во-вторых, в каждый момент времени форма волны (т. е. профиль шнура) повторяется на протяжении шнура через отрезки длиной λ. На рисунке 6.9 черной линией по-

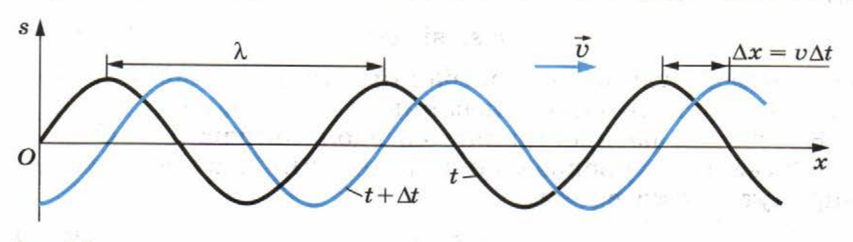


Рис. 6.9

казан профиль шнура в определенный момент времени t (мгновенный снимок волны). С течением времени этот профиль перемещается.

Спустя промежуток времени Δt волна будет иметь вид, изображенный на том же рисунке синей линией.

Для продольной волны также справедлива формула (6.2), связывающая скорость распространения волны, длину волны и частоту колебаний.

Все волны распространяются с конечной скоростью. Длина волны зависит от скорости ее распространения и частоты колебаний.



1. **Что называют длиной волны?**
2. **Как связаны скорость волны и длина волны?**
3. **Определите по рисунку 6.8, какова разность фаз колебаний двух соседних шаров; двух шаров, находящихся на расстоянии, равном длине волны.**

§ 45 УРАВНЕНИЕ ГАРМОНИЧЕСКОЙ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ

Выведем уравнение волны, которое позволит определить смещение каждой точки среды в любой момент времени при распространении гармонической волны.

Сделаем это на примере волны, бегущей по длинному тонкому резиновому шнуру.

Ось OX направим вдоль шнура, а начало отсчета свяжем с левым концом шнура. Смещение колеблющейся точки шнура от положения равновесия обозначим буквой s. Для описания волнового процесса нужно знать смещение каждой точки шнура в любой момент времени. Следовательно, надо знать вид функции

$$s = s(x, t).$$

Заставим конец шнура (точка с координатой $x = 0$) совершать гармонические колебания с циклической частотой ω. Колебания этой точки будут происходить по закону:

$$s = s_m \sin \omega t, \qquad (6.3)$$

если начальную фазу колебаний считать равной нулю. Здесь s_m — амплитуда колебаний (рис. 6.10, *а*).

Колебания распространяются вдоль шнура (оси OX) со скоростью v и в произвольную точку шнура с координатой x придут спустя время

$$\tau = \frac{x}{v}. \qquad (6.4)$$

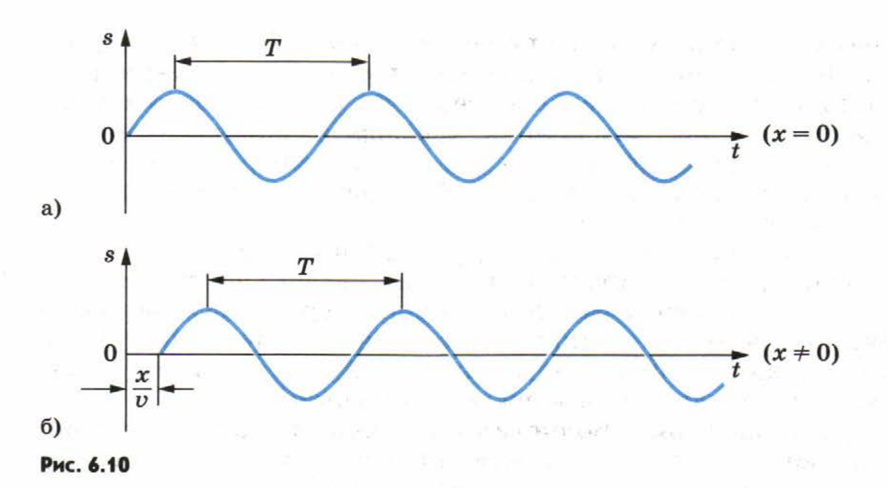


Рис. 6.10

Эта точка также начнет совершать гармонические колебания с частотой ω, но с запаздыванием на время τ (рис. 6.10, *б*). Если пренебречь затуханием волны по мере ее распространения, то колебания в точке x будут происходить с той же амплитудой s_m, но с другой фазой:

$$s = s_m \sin(\omega(t - \tau)) = s_m \sin\left[\omega\left(t - \frac{x}{v}\right)\right]. \qquad (6.5)$$

Это и есть **уравнение гармонической бегущей волны,** распространяющейся в положительном направлении оси OX.

Используя уравнение (6.5) можно определить смещение различных точек шнура в любой момент времени.

§ 46 РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН В УПРУГИХ СРЕДАХ

На резиновом шнуре, по струне или в тонком стержне волны могут распространяться только по одному направлению — вдоль шнура, струны или стержня. Если же газ, жидкость или твердое тело сплошь заполняют некоторую область пространства (сплошная среда), то возникшие в одном месте колебания распространяются по всем направлениям.

Волна при распространении от какого-либо источника в сплошной среде постепенно захватывает все более обширные области пространства.

Это хорошо видно на рисунке 6.1, на котором изображены круговые волны на поверхности воды от брошенного камня. Энергия, которую несут с собой волны, с течением

времени распределяется по все большей и большей поверхности. Поэтому энергия, переносимая через поверхность единичной площади за одну секунду, уменьшается по мере удаления от источника волн. Следовательно, уменьшается и амплитуда колебаний частиц среды по мере удаления от источника. Ведь энергия колеблющегося тела пропорциональна квадрату амплитуды его колебаний. Это справедливо для колебаний не только груза на пружине или какого-нибудь другого маятника, но и для любой частицы среды.

Таким образом, амплитуда волны в среде по мере удаления волны от источника обязательно уменьшается, даже если механическая энергия не превращается во внутреннюю за счет действия в среде сил трения.

Плоская волна. Волновая поверхность и луч. Исключение составляет так называемая **плоская волна**. Такую волну можно получить, если поместить в упругую среду большую пластину и заставить ее колебаться в направлении нормали к пластине. Все точки среды, примыкающие к пластине с одной стороны, будут совершать колебания с одинаковыми амплитудами и фазами. Эти колебания будут распространяться в виде волн в направлении нормали к пластине, причем все частицы среды, лежащие в плоскости, параллельной пластине, будут колебаться в одной фазе. Поверхность равной фазы называется **волновой поверхностью**. В случае плоской волны волновые поверхности представляют собой плоскости (рис. 6.11). Так как все точки, принадлежащие одной волновой поверхности, колеблются одинаково, то уравнение плоской бегущей волны будет иметь вид

$$s = s_m \sin\left[\omega\left(t - \frac{x}{v}\right)\right],$$

где s — смещение всех точек волновой поверхности в данный момент времени, а ось X совпадает с направлением распространения волны и, соответственно, перпендикулярна волновой поверхности.

Волна может считаться плоской лишь приближенно (на краях волновые поверхности искривляются).

Линия, нормальная к волновой поверхности, называется **лучом**. Под направлением распространения волн понимают направление именно лучей. Лучи для плоских волн представляют собой параллельные прямые (см. рис. 6.11). Вдоль лучей происходит перенос энергии.

При распространении плоской волны размеры волновых поверхностей по мере удаления от пластины

Рис. 6.11

не меняются (или почти не меняются). Поэтому энергия волны не рассеивается в пространстве и амплитуда колебаний частиц среды уменьшается только за счет действия сил трения.



Рис. 6.12

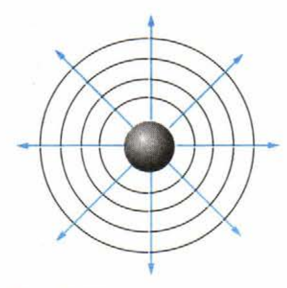


Рис. 6.13

На поверхности воды легко получить **линейные волны**, которые дают наглядное представление о плоских волнах в пространстве. Для этого нужно стержень, слегка касающийся поверхности воды, заставить колебаться в направлении, перпендикулярном поверхности воды. Все частицы воды, находящиеся на прямой, параллельной стержню, будут колебаться в одинаковой фазе (рис. 6.12).

Фронтом волны называется геометрическое место точек, до которых дошли возмущения в данный момент времени. Фронт волны отделяет часть пространства, в которой возникли колебания, от той части пространства, в которой колебаний нет. Волновых поверхностей существует сколь угодно много, фронт волны один. Очевидно, что фронт волны — волновая поверхность, на которой фаза колебаний равна нулю.

Сферическая волна. Другой пример волны в сплошной среде — это **сферическая волна**. Она возникает, если поместить в среду пульсирующую сферу (рис. 6.13). В этом случае волновые поверхности являются сферами. Лучи направлены вдоль продолжений радиусов пульсирующей сферы.

Амплитуда колебаний частиц в сферической волне обязательно убывает по мере удаления от источника. Энергия, излучаемая источником, в этом случае равномерно распределяется по поверхности сферы, радиус которой непрерывно увеличивается по мере распространения волны.

По форме фронта волны и волновых поверхностей проводится классификация волн. Мы ввели понятия плоской и сферической волн.

§ 47 ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ

Волны на поверхности воды или на резиновом шнуре можно непосредственно увидеть. В прозрачной среде — воздухе или жидкости — волны невидимы. Но при определенных условиях их зато можно слышать.

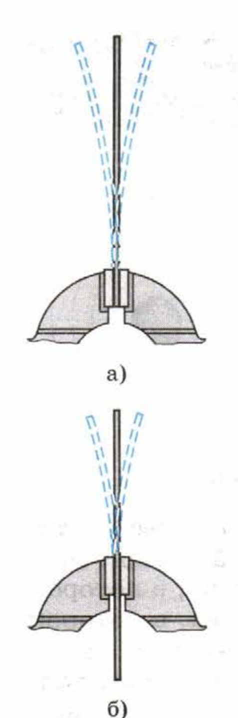


Рис. 6.14

Возбуждение звуковых волн. Если длинную стальную линейку зажать в тисках или плотно прижать к краю стола, то, отклонив конец линейки от положения равновесия, мы возбудим ее колебания (рис. 6.14, *а*). Но эти колебания не будут восприниматься нашим ухом. Если, однако, укоротить выступающий конец линейки (рис. 6.14, *б*), то мы обнаружим, что линейка начнет звучать. Дело здесь вот в чем.

Пластина в ходе колебаний вдоль нормали к ней сжимает прилегающий к одной из ее сторон слой воздуха и одновременно создает разрежение с другой стороны. Эти сжатия и разрежения чередуются во времени и распространяются в обе стороны в виде упругих продольных волн. Одна из них достигает нашего уха и вызывает вблизи него периодические колебания давления, которые воздействуют на слуховой аппарат. Ухо человека воспринимает в виде звука колебания, частота которых лежит в пределах от 17 до 20 000 Гц. Такие колебания называются **акустическими**. *Акустика — это учение о звуке*. Чем короче выступающий конец линейки, тем больше частота его колебаний. Поэтому мы и начинаем слышать звук, когда выступающий конец стальной линейки становится достаточно коротким.

Любое тело (твердое, жидкое или газообразное), колеблющееся со звуковой частотой, создает в окружающей среде звуковую волну.

Звуковые волны в различных средах. Чаще всего звуковые волны достигают наших ушей по воздуху. Довольно редко мы оказываемся погруженными целиком, вместе с ушами, в воду. Но, конечно, воздух не имеет каких-либо особых преимуществ по сравнению с другими средами в смысле возможности распространения в нем звуковых волн. Звук распространяется в воде и твердых телах. Нырнув с головой во время купания, вы можете услышать звук, например, от удара двух камней, производимого в воде на большом расстоянии (рис. 6.15).

Хорошо проводит звук земля. Русский историк Н. М. Карамзин сообщает, что Дмитрий Донской перед Куликовской битвой, приложив ухо к земле, услышал топот копыт конницы противника, когда она еще не была видна.

Если поднести вплотную к уху конец длинной деревянной линейки и слегка постучать по другому ее концу руч-

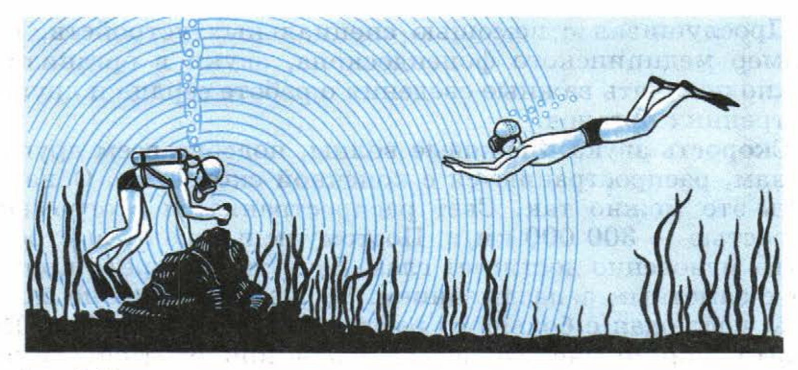


Рис. 6.15

кой, то будет отчетливо слышен звук. Отодвинув же линейку немного от уха, вы обнаружите, что звук почти перестает быть слышимым.

В вакууме звуковые волны распространяться не могут. Для доказательства этого можно, например, электрический звонок поместить под колокол воздушного насоса (рис. 6.16). По мере того как давление воздуха под колоколом уменьшается, звук будет ослабевать до тех пор, пока не прекратится совсем.

Плохо проводят звук такие материалы, как войлок, пористые панели, прессованная пробка и т. д. Эти материалы используют для звукоизоляции, т. е. для защиты помещений от проникновения в них посторонних звуков.

Значение звука. Для того чтобы мы могли уверенно ориентироваться в мире, наш мозг должен получать информацию о том, что происходит вокруг нас. Зрение и слух играют в этом главную роль. Осязание, обоняние и вкусовые ощущения менее существенны.

Конечно, наибольшее количество информации мы получаем с помощью света. Испущенный источниками (солнцем, лампой и т. д.) свет отражается от окружающих предметов и, попадая в глаз, позволяет нам судить об их положении и движении. Многие предметы светятся сами.

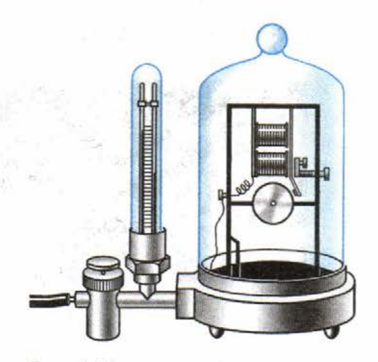


Рис. 6.16

Отраженные от предметов звуковые волны или волны, испускаемые звучащими предметами, также дают нам сведения об окружающем мире. Но главное — это речь. Мы создаем и воспринимаем звуковые волны и тем самым общаемся друг с другом.

Прослушивая с помощью специальных устройств, например медицинского фонендоскопа, звуки в организме, можно получать важные сведения о работе сердца и других внутренних органов.

Скорость звука. Звуковые волны, подобно всем другим волнам, распространяются с конечной скоростью. Обнаружить это можно так. Свет распространяется с огромной скоростью — 300 000 км/с. Поэтому вспышка от выстрела почти мгновенно достигает глаз. Звук же выстрела приходит с заметным запаздыванием. То же самое можно заметить, наблюдая с большого расстояния игру в футбол. Вы видите удар по мячу, а звук от удара приходит спустя некоторое время. Все, вероятно, замечали, что вспышка молнии предшествует раскату грома. Если гроза далеко, то время запаздывания грома достигает нескольких десятков секунд. Наконец, из-за конечной скорости звука появляется эхо. Эхо — это звуковая волна, отраженная от опушки леса, крутого берега, здания и т. д.

Скорость звука в воздухе при 0 °С равна 331 м/с. Это довольно большая скорость. Лишь совсем недавно самолеты начали летать со скоростями, превышающими скорость звука.

Скорость звука в воздухе не зависит от его плотности. Она примерно равна средней скорости теплового движения молекул и, подобно ей, пропорциональна корню квадратному из абсолютной температуры. Чем больше масса молекул газа, тем меньше скорость звука в нем. Так, при 0 °С скорость звука в водороде 1270 м/с, а в углекислом газе 258 м/с.

В жидкости скорость звука больше, чем в газе. Впервые скорость звука в воде была измерена в 1827 г. на Женевском озере в Швейцарии. На одной лодке поджигали порох и одновременно ударяли в подводный колокол (рис. 6.17, *а*). Другая лодка находилась на расстоянии 14 км от первой. Звук колокола улавливался с помощью рупора, опущенного в воду (рис. 6.17, *б*). По разности времени между вспышкой света и приходом звукового сигнала определили скорость звука. При температуре 8 °С скорость звука в воде равна 1435 м/с.

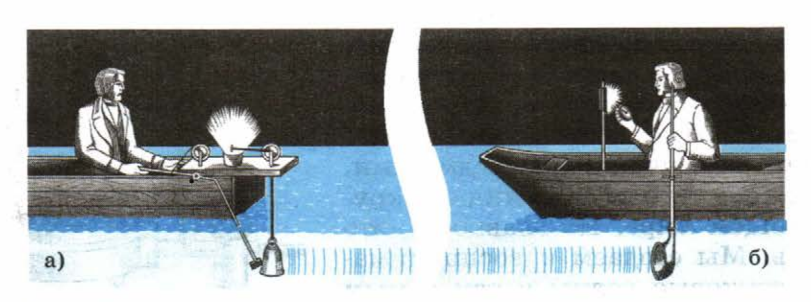


Рис. 6.17

В твердых телах скорость звука еще больше, чем в жидкостях. Например, в стали скорость звука при 15 °С равна 4980 м/с. То, что скорость звука в твердом теле больше, чем в воздухе, можно обнаружить так. Если ваш помощник ударит по одному концу рельса, а вы приложите ухо к другому концу, то будут слышны два удара. Сначала звук достигает уха по рельсам, а затем по воздуху.

По известной частоте колебаний и скорости звука в воздухе можно вычислить длину звуковой волны (см. § 44). Самые длинные волны, воспринимаемые ухом человека, имеют длину волны $\lambda \approx 19$ м, а самые короткие — длину волны $\lambda \approx 17$ мм.

Колебания со звуковой частотой (17—20 000 Гц) создают в окружающей среде звуковую волну, скорость которой зависит от свойств среды и температуры.



1. **Какую волну называют плоской? сферической?**
2. **Почему в газах и жидкостях не существует поперечных волн?**
3. **Какие колебания называют акустическими?**
4. **От чего зависит скорость звука в воздухе?**



УПРАЖНЕНИЕ 6

1. На расстоянии $s = 1060$ м от наблюдателя ударяют молотком по железнодорожному рельсу. Наблюдатель, приложив ухо к рельсу, услышал звук на $\tau = 3$ с раньше, чем звук дошел до него по воздуху. Чему равна скорость звука в стали? (Скорость звука в воздухе принять равной 330 м/с.)

2. Определите разность фаз между двумя точками звуковой волны в воздухе, если разность их расстояний от источника составляет 25 см, а частота колебаний равна $\nu = 680$ Гц. (Скорость звука принять равной 340 м/с.)

3. Во сколько раз изменится длина звуковой волны при переходе звука из воздуха в воду? Скорость звука в воде 1435 м/с, в воздухе 340 м/с.

КРАТКИЕ ИТОГИ ГЛАВЫ 6

1. Колебания, распространяющиеся в пространстве с течением времени, называются волнами. Волна переносит в среде энергию, но не переносит вещество среды.
2. Различают поперечные и продольные волны. В поперечной волне колебания частиц среды происходят перпендикулярно направлению ее распространения, а в продольной — вдоль этого направления. Механические волны могут распространяться только в упругих средах.

3. Расстояние, на которое распространяется волна за время, равное одному периоду колебаний, называют длиной волны.
4. Все волны распространяются с конечной скоростью. От скорости υ распространения волны и частоты колебаний частиц ν зависит длина волны:

$$\lambda = \frac{\upsilon}{\nu}.$$

5. Продольные волны в среде с частотой колебаний от 17 до 20 000 Гц называют звуковыми или акустическими. Скорость звуковых волн зависит от свойств среды и температуры.

В дальнейшем мы ознакомимся с важнейшими свойствами волн любой природы: интерференцией и дифракцией.

Глава 7. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

Механические волны распространяются только в упругих средах: газе, жидкости или твердом теле. Существуют, однако, волны, которые не нуждаются в каком-либо веществе для своего распространения. Это электромагнитные волны. К ним, в частности, относятся радиоволны и свет. Электромагнитное поле может существовать в вакууме, т. е. в пространстве, не содержащем атомов. Несмотря на существенное отличие электромагнитных волн от механических, электромагнитные волны при распространении ведут себя подобно механическим.

§ 48 ЧТО ТАКОЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ВОЛНА

Распространение электромагнитных взаимодействий. Фундаментальные законы природы, к числу которых относятся и открытые Максвеллом законы электромагнетизма, замечательны тем, что они могут дать гораздо больше, чем заключено в тех фактах, на основе которых они получены.

Среди бесчисленных, очень интересных и важных следствий, вытекающих из максвелловских законов электромагнетизма, одно заслуживает особого внимания. Это вывод о том, что электромагнитное взаимодействие распространяется с конечной скоростью.

Согласно теории дальнодействия кулоновская сила, действующая на электрический заряд, сразу же изменится, если соседний заряд сдвинуть с места. Действие, по этой теории, передается мгновенно. С точки зрения этой гипотезы

иначе и быть не может: ведь один заряд непосредственно через пустоту «чувствует» присутствие другого.

Согласно же представлению о близкодействии все происходит не только совершенно иначе, но и намного сложнее. Перемещение заряда меняет электрическое поле вблизи него. Это переменное электрическое поле порождает переменное магнитное поле в соседних областях пространства. Переменное же магнитное поле, в свою очередь, порождает переменное электрическое поле и т. д.

Перемещение заряда вызывает, таким образом, «возмущение» электромагнитного поля, которое, распространяясь, охватывает все бо́льшие и бо́льшие области окружающего пространства, изменяя то поле, которое существовало до смещения заряда. Наконец, это «возмущение» достигает другого заряда, что и приводит к изменению действующей на него силы. Но произойдет это не в тот момент времени, когда произошло смещение первого заряда. Процесс распространения электромагнитного возмущения, механизм которого был открыт Максвеллом, происходит с конечной, хотя и очень большой, скоростью. В этом и состоит фундаментальное свойство поля, которое не оставляет сомнений в его реальности.

Максвелл математически доказал, что скорость распространения этого процесса («возмущения» электромагнитного поля) равна скорости света в вакууме.

Электромагнитная волна. Представьте себе, что электрический заряд не просто сместился из одной точки в другую, а был приведен в быстрые колебания вдоль некоторой прямой. Заряд движется подобно телу, подвешенному на пружине, но только колебания его происходят со значительно большей частотой. Тогда электрическое поле в непосредственной близости от заряда начнет периодически изменяться. Период этих изменений, очевидно, будет равен периоду колебаний заряда. Переменное электрическое поле будет порождать периодически меняющееся магнитное поле, а оно, в свою очередь, вызовет появление переменного электрического поля уже на большем расстоянии от заряда и т. д.

В окружающем заряд пространстве, захватывая все бо́льшие и бо́льшие области, возникает система взаимно перпендикулярных, периодически изменяющихся электрических и магнитных полей. На рисунке 7.1 изображен «мгновенный снимок» такой системы полей на большом расстоянии от колеблющегося заряда.

На этом рисунке показаны векторы $\vec{E}$ и $\vec{B}$ в различных точках пространства. Направление Z — одно из направлений распространения электромагнитных возмущений.

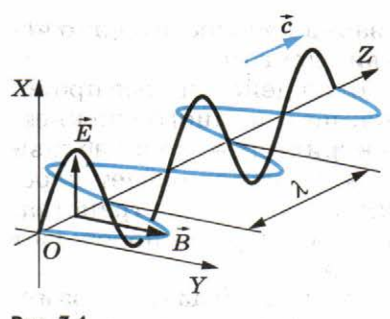


Рис. 7.1

Образуется так называемая **электромагнитная волна**, бегущая по всем направлениям от колеблющегося заряда.

В каждой точке пространства электрические и магнитные поля меняются во времени периодически. Чем дальше расположена точка от заряда, тем позднее достигнут ее колебания векторов $\vec{E}$ и $\vec{B}$. Следовательно, на разных расстояниях от заряда колебания каждого из этих векторов происходят с различными фазами.

Колебания векторов $\vec{E}$ и $\vec{B}$ в любой точке совпадают по фазе. Кратчайшее расстояние между двумя ближайшими точками, в которых колебания происходят в одинаковых фазах, есть длина волны λ. В данный момент времени векторы $\vec{E}$ и $\vec{B}$ меняются в пространстве по оси Z по закону синуса с периодом λ.

Направления этих двух колеблющихся векторов — напряженности электрического поля и индукции магнитного поля — перпендикулярны направлению распространения волны. *Электромагнитная волна является поперечной.*

Таким образом, векторы $\vec{E}$ и $\vec{B}$ в электромагнитной волне перпендикулярны друг к другу и перпендикулярны направлению распространения волны. Если вращать буравчик с правой нарезкой от вектора $\vec{E}$ к вектору $\vec{B}$, то поступательное перемещение буравчика будет совпадать с направлением вектора скорости волны $\vec{c}$ (см. рис. 7.1).

Излучение электромагнитных волн. Электромагнитные волны излучаются колеблющимися зарядами. При этом существенно, что скорость движения таких зарядов меняется со временем, т. е. что они движутся с ускорением. *Наличие ускорения у движущихся зарядов* — главное условие излучения ими электромагнитных волн.

Электромагнитное поле излучается заметным образом не только при колебаниях заряда, но и при любом достаточно быстром изменении его скорости. Интенсивность излучаемой волны тем больше, чем больше ускорение, с которым движется заряд.

Наглядно это можно представить себе так. При движении заряженной частицы с постоянной скоростью созданные ею электрическое и магнитное поля, подобно развевающемуся шлейфу, сопровождают частицу. При ускорении частицы

обнаруживается присущая электромагнитному полю инертность. Поле «отрывается» от частицы и начинает самостоятельное существование в форме электромагнитных волн.

Энергия электромагнитного поля волны в любой фиксированный момент времени меняется периодически в пространстве, вместе с изменением векторов $\vec{E}$ и $\vec{B}$. Бегущая волна несет с собой энергию, перемещающуюся со скоростью $\vec{c}$ вдоль направления распространения волны. В результате этого энергия, переносимая электромагнитной волной в любой точке пространства, меняется периодически со временем.

Максвелл был глубоко убежден в реальности электромагнитных волн. Но он не дожил до их экспериментального обнаружения. Лишь через 10 лет после его смерти электромагнитные волны были экспериментально получены Г. Герцем.

Электромагнитные волны возникают из-за того, что переменное электрическое поле порождает переменное магнитное поле. Это переменное магнитное поле, в свою очередь, порождает переменное электрическое поле. Электромагнитная волна переносит энергию.



1. Как ориентированы векторы $\vec{E}$, $\vec{B}$ и $\vec{c}$ по отношению друг к другу в электромагнитной волне?

2. Как должна двигаться частица, чтобы она излучала электромагнитные волны?

§ 49 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Как мы уже знаем, электромагнитная волна образуется в результате взаимной связи переменных электрических и магнитных полей. Изменение одного поля приводит к появлению другого.

В § 12 и 17 говорилось, что, чем быстрее меняется со временем магнитная индукция, тем больше напряженность возникающего электрического поля. И в свою очередь, чем быстрее меняется напряженность электрического поля, тем больше магнитная индукция.

Следовательно, *для образования интенсивных электромагнитных волн необходимо создать электромагнитные колебания достаточно высокой частоты*. Именно при этом условии напряженность электрического поля $\vec{E}$ и индукция магнитного поля $\vec{B}$ будут меняться быстро.

Колебания высокой частоты, значительно превышающей частоту промышленного тока (50 Гц), можно получить с помощью колебательного контура. Циклическая частота колебаний

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

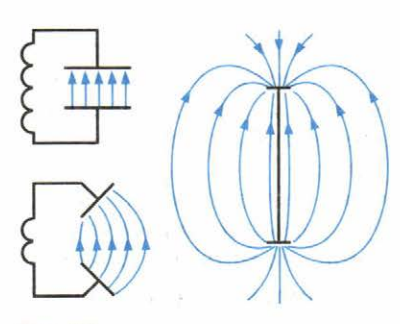
будет тем больше, чем меньше индуктивность L и емкость C контура.

Открытый колебательный контур. Однако большая частота электромагнитных колебаний еще не гарантирует интенсивного излучения электромагнитных волн. В обычном контуре, какой изображен на рисунке 4.3 (его можно назвать закрытым), почти все магнитное поле сосредоточено внутри катушки, а электрическое — внутри конденсатора. Вдали от контура электромагнитного поля практически нет. Такой контур очень слабо излучает электромагнитные волны.

Для получения электромагнитных волн Г. Герц использовал простое устройство, которое в его честь было названо **вибратором Герца.** Это устройство представляет собой *открытый колебательный контур*.

К открытому контуру можно перейти от закрытого, если постепенно раздвигать пластины конденсатора (рис. 7.2), уменьшая их площадь и одновременно уменьшая число витков в катушке. В конце концов получится просто прямой провод. Это и есть открытый колебательный контур. Емкость и индуктивность вибратора Герца малы. Потому соответствующая им частота колебаний весьма велика.

В открытом контуре заряды не сосредоточены на его концах, а распределены по всему проводнику. Ток в данный момент времени во всех сечениях проводника направлен в одну и ту же сторону, но сила тока неодинакова в различных сечениях проводника. На концах она равна нулю, а посредине достигает максимума. (Напомним, что в обычных цепях переменного тока сила тока во всех сечениях в данный момент времени одинакова.) Электромагнитное поле охватывает все пространство вблизи контура.


Рис. 7.2

Для возбуждения колебаний в таком контуре во времена Герца поступали так. Провод разрезали посредине с таким расчетом, чтобы оставался небольшой воздушный промежуток, называемый искровым (рис. 7.3). Обе части проводника заряжали до высокой разности потенциалов. Когда разность потенциалов превышала некоторое пре-

Герц Генрих (1857—1894) — немецкий физик, впервые экспериментально доказавший в 1886 г. существование электромагнитных волн. Исследуя электромагнитные волны, он установил тождественность основных свойств электромагнитных и световых волн. Его работы послужили экспериментальным доказательством справедливости теории электромагнитного поля и, в частности, электромагнитной теории света. Им были записаны уравнения Максвелла в современной форме. В 1886 г. впервые наблюдал фотоэффект.



дельное значение, проскакивала искра (рис. 7.4), цепь замыкалась, и в открытом контуре возникали колебания.

Колебания в открытом контуре затухают по двум причинам: во-первых, вследствие наличия у контура активного сопротивления; во-вторых, из-за того, что вибратор излучает электромагнитные волны и теряет при этом энергию. После того как колебания прекращаются, оба проводника вновь заряжают от источника до наступления пробоя искрового промежутка, и все повторяется сначала.

В настоящее время для получения незатухающих колебаний в открытом колебательном контуре его связывают индуктивно с колебательным контуром генератора на транзисторе или генератора другого типа.

Опыты Герца. Герц получал электромагнитные волны, возбуждая в вибраторе с помощью источника высокого напряжения серию импульсов быстропеременного тока. Колебания электрических зарядов в вибраторе создают электромагнитную волну. Только колебания в вибраторе совершает не одна заряженная частица, а огромное число электронов, движущихся согласованно. В электромагнитной волне векторы $\vec{E}$ и $\vec{B}$ перпендикулярны друг другу. В данном случае вектор $\vec{E}$ лежит в плоскости, проходящей через вибратор, а вектор $\vec{B}$ перпендикулярен этой плоскости. Излучение волн происходит с максимальной интенсивностью в направлении, перпендикулярном оси вибратора. Вдоль этой оси излучения не происходит.

Электромагнитные волны регистрировались Герцем с помощью приемного вибратора (резонатора), представляюще-

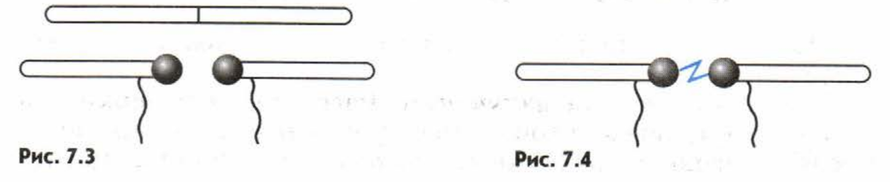


Рис. 7.3

Рис. 7.4

го собой такое же устройство, как и излучающий вибратор. Под действием переменного электрического поля электромагнитной волны в приемном вибраторе возбуждаются колебания тока. Если собственная частота приемного вибратора совпадает с частотой электромагнитной волны, наблюдается резонанс. Колебания в резонаторе происходят с большей амплитудой при расположении его параллельно излучающему вибратору. Герц обнаружил эти колебания, наблюдая искорки в очень маленьком промежутке между проводниками приемного вибратора.

Ученый не только получил электромагнитные волны, но и открыл, что они ведут себя подобно другим видам волн. В частности, он наблюдал отражение электромагнитных волн от металлического листа и сложение волн. При сложении волны, идущей от вибратора, с волной, отраженной от металлического листа, образуются максимумы и минимумы амплитуды колебаний — так называемая *интерференционная картина* (подробнее об интерференции см. § 67—69). Если перемещать резонатор, можно найти положения максимумов и определить длину волны.

Скорость электромагнитных волн. В опытах Герца длина волны составляла несколько десятков сантиметров. Вычислив собственную частоту электромагнитных колебаний вибратора, Герц смог определить скорость электромагнитной волны по формуле $v = \lambda\nu$. Она оказалась приближенно равной скорости света: $c \approx 300\ 000$ км/с.

Опытами Герца были блестяще подтверждены предсказания Максвелла.

Для излучения электромагнитных волн нужно создать электромагнитные колебания высокой частоты в открытом колебательном контуре.



1. **Почему обычный (закрытый) колебательный контур нельзя использовать для излучения и регистрации электромагнитных волн?**
2. **Чему равна скорость распространения электромагнитных взаимодействий?**
3. **Передающий и приемный вибраторы расположены взаимно перпендикулярно. Возникнут ли колебания в приемном вибраторе?**

§ 50 ПЛОТНОСТЬ ПОТОКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Излучаемые электромагнитные волны несут с собой энергию.

Плотность потока излучения. Рассмотрим поверхность площадью S, через которую электромагнитные волны переносят энергию. На рисунке 7.5 изображена такая площадка.

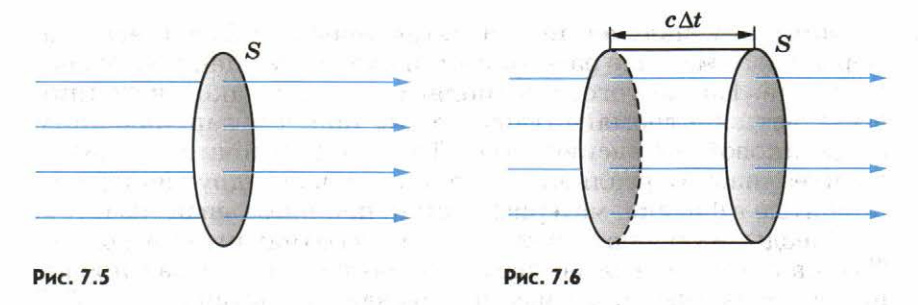


Рис. 7.5 Рис. 7.6

Прямые линии указывают направления распространения электромагнитных волн. Это *лучи* — линии, перпендикулярные поверхностям, во всех точках которых колебания происходят в одинаковых фазах. Такие поверхности называются *волновыми поверхностями* (см. § 46). **Плотностью потока электромагнитного излучения** I называют отношение электромагнитной энергии ΔW, проходящей за время Δt через перпендикулярную лучам поверхность площадью S, к произведению площади S на время Δt:

$$I = \frac{\Delta W}{S\Delta t}. \quad (7.1)$$

Фактически это мощность электромагнитного излучения (энергия в единицу времени), проходящего через единицу площади поверхности. Плотность потока излучения в СИ выражают *в ваттах на квадратный метр* (Вт/м^2). Иногда эту величину называют *интенсивностью волны*.

Выразим I через плотность электромагнитной энергии и скорость ее распространения c. Выберем поверхность площадью S, перпендикулярную лучам, и построим на ней как на основании цилиндр с образующей $c\Delta t$ (рис. 7.6). Объем цилиндра $\Delta V = Sc\Delta t$. Энергия электромагнитного поля внутри цилиндра равна произведению плотности энергии на объем: $\Delta W = wc\Delta tS$. Вся эта энергия за время Δt пройдет через правое основание цилиндра. Поэтому из формулы (7.1) получаем

$$I = \frac{wc\Delta tS}{S\Delta t} = wc, \quad (7.2)$$

т. е. **плотность потока излучения** равна произведению плотности электромагнитной энергии на скорость ее распространения.

Найдем зависимость плотности потока излучения от расстояния до источника. Для этого надо ввести еще одно новое понятие.

Точечный источник излучения. Источники излучения электромагнитных волн могут быть весьма разнообразными. Простейшим является *точечный источник*.

Источник излучения считается точечным, если его размеры много меньше расстояния, на котором оценивается его действие. Кроме того, предполагается, что такой источник посылает электромагнитные волны по всем направлениям с одинаковой интенсивностью. Точечный источник — такая же идеализация реальных источников, как и другие модели, принятые в физике: материальная точка, идеальный газ и т. д.

Звезды излучают свет, т. е. электромагнитные волны. Так как расстояния до звезд в огромное число раз превышают их размеры, то именно звезды представляют собой лучшее реальное воплощение точечных источников.

Зависимость плотности потока излучения от расстояния до точечного источника. Энергия, которую переносят электромагнитные волны, с течением времени распределяется по все большей и большей поверхности. Поэтому энергия, передаваемая через поверхность единичной площадки за единицу времени, т. е. плотность потока излучения, уменьшается по мере удаления от источника.

Поместим точечный источник в центр сферы радиусом R. Площадь поверхности сферы $S = 4\pi R^2$. Если считать, что источник по всем направлениям за время Δt излучает суммарную энергию ΔW, то

$$I = \frac{\Delta W}{S\Delta t} = \frac{\Delta W}{4\pi\Delta t} \cdot \frac{1}{R^2}. \qquad (7.3)$$

Плотность потока излучения от точечного источника убывает обратно пропорционально квадрату расстояния до источника.

Зависимость плотности потока излучения от частоты. Излучение электромагнитных волн происходит при ускоренном движении заряженных частиц (см. § 48). Напряженность электрического поля $\vec{E}$ и магнитная индукция $\vec{B}$ электромагнитной волны пропорциональны ускорению $\vec{a}$ излучающих частиц. Ускорение при гармонических колебаниях пропорционально квадрату частоты. Поэтому напряженность электрического поля и магнитная индукция также пропорциональны квадрату частоты:

$$E \sim a \sim \omega^2, \ B \sim a \sim \omega^2. \qquad (7.4)$$

Плотность энергии электрического поля пропорциональна квадрату напряженности поля. Энергия магнитного поля, как это можно показать, пропорциональна квадрату магнитной индукции. Полная плотность энергии электромагнитного поля равна сумме плотностей энергий электрического и магнитного полей. С учетом формулы (7.2) плотность потока излучения

$$I \sim w \sim (E^2 + B^2). \qquad (7.5)$$

Так как согласно выражениям (7.4) $E \sim \omega^2$ и $B \sim \omega^2$, то

$$I \sim \omega^4. \qquad (7.6)$$

Плотность потока излучения пропорциональна четвертой степени частоты.

При увеличении частоты колебаний заряженных частиц в 2 раза излучаемая энергия возрастает в 16 раз! В антеннах радиостанций поэтому возбуждают колебания больших частот: от десятков тысяч до десятков миллионов герц.

Электромагнитные волны переносят энергию. Плотность потока излучения (интенсивность волны) равна произведению плотности энергии на скорость ее распространения. Интенсивность волны пропорциональна четвертой степени частоты и убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от источника.



1. **Какую величину называют плотностью потока электромагнитного излучения?**
2. **Какой источник излучения называется точечным?**
3. **Почему переменный ток в осветительной сети практически не излучает электромагнитных волн?**

§ 51 ИЗОБРЕТЕНИЕ РАДИО А. С. ПОПОВЫМ

Опыты Герца, описание которых появилось в 1888 г., заинтересовали физиков всего мира. Ученые стали искать пути усовершенствования излучателя и приемника электромагнитных волн.

В России одним из первых изучением электромагнитных волн занялся преподаватель офицерских курсов в Кронштадте А. С. Попов. Начав с воспроизведения опытов Герца, он затем использовал более надежный и чувствительный способ регистрации электромагнитных волн.

В качестве детали, непосредственно «чувствующей» электромагнитные волны, А. С. Попов применил когерер. Этот прибор представляет собой стеклянную трубку с двумя электродами. В трубке помещены мелкие металлические опилки. Принцип действия прибора основан на влиянии электрических разрядов на металлические порошки. В обычных условиях когерер обладает большим сопротивлением, так как опилки имеют плохой контакт друг с другом. Последовательно с когерером включаются электромагнитное реле и источник постоянного напряжения (рис. 7.7). Пришедшая электромагнитная волна создает в когерере переменный ток высокой частоты. Между опилками проскакивают мельчайшие искорки, в результате сопротивление когерера резко падает (в опытах А. С. Попова от 100 000 до 1000—500 Ом, т. е.



Попов Александр Степанович (1859—1906) — русский физик, изобретатель радио. Убежденный в возможности связи без проводов при помощи электромагнитных волн, построил первый в мире радиоприемник, применив в его схеме чувствительный элемент — когерер. Во время опытов по радиосвязи с помощью приборов Попова было впервые обнаружено отражение радиоволн от кораблей.

в 100—200 раз). Сила тока в катушке электромагнитного реле возрастает, и оно включает звонок. Молоточек звонка, ударяя по когереру, встряхивает его и возвращает в исходное состояние. С последним встряхиванием когерера аппарат готов к приему новой волны. Схема приемника А. С. Попова приведена на рисунке 7.7, который был взят из его статьи в «Журнале Русского физико-химического общества».

Чтобы повысить чувствительность аппарата, А. С. Попов один из выводов когерера заземлил, а другой присоединил к высоко поднятому куску проволоки, создав тем самым первую в мире приемную антенну для беспроволочной связи. Заземление превращает проводящую поверхность земли в часть открытого колебательного контура, что увеличивает дальность приема.

Хотя современные радиоприемники очень мало напоминают приемник А. С. Попова, основные принципы их действия те же, что и в его приборе. Современный приемник также имеет антенну, в которой приходящая волна вызывает очень слабые электромагнитные колебания. Как и в приемнике А. С. Попова, энергия этих колебаний не используется непосредственно для приема. Слабые сигналы лишь управляют источниками энергии, питающими последующие цепи. Сейчас такое управление осуществляется с помощью полупроводниковых приборов.

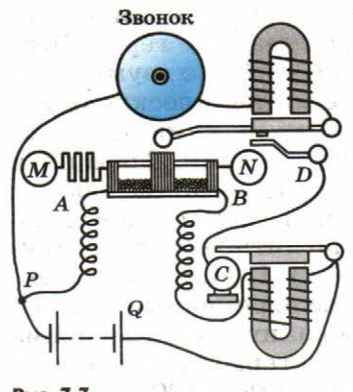


Рис. 7.7

7 мая 1895 г. на заседании Русского физико-химического общества в Петербурге А. С. Попов продемонстрировал действие своего прибора, явившегося, по сути дела, первым в мире радиоприемником. День 7 мая стал днем рождения радио. Ныне он ежегодно отмечается в нашей стране.

А. С. Попов продолжал настойчиво совершенствовать приемную и передающую аппаратуру. Он ставил своей непосредственной задачей создать прибор для передачи сигналов на большие расстояния.

Вначале радиосвязь была установлена на расстоянии 250 м. Неустанно работая над своим изобретением, А. С. Попов вскоре добился дальности связи более 600 м. Затем на маневрах Черноморского флота в 1899 г. ученый установил радиосвязь на расстоянии свыше 20 км, а в 1901 г. дальность радиосвязи была уже 150 км. Важную роль в этом сыграла новая конструкция передатчика. Искровой промежуток был размещен в колебательном контуре, индуктивно связанном с передающей антенной и настроенном с ней в резонанс. Существенно изменились и способы регистрации сигнала. Параллельно звонку был подключен телеграфный аппарат, позволивший вести автоматическую запись сигналов. В 1899 г. была обнаружена возможность приема сигналов с помощью телефона. В начале 1900 г. радиосвязь успешно использовали в ходе спасательных работ в Финском заливе. При участии А. С. Попова радиосвязь начали применять на флоте и в армии России.

За границей усовершенствование подобных приборов проводилось фирмой, организованной итальянским инженером Г. Маркони. Опыты, поставленные в широком масштабе, позволили осуществить радиотелеграфную передачу через Атлантический океан.

Впервые радиосвязь была установлена в России А. С. Поповым, создавшим аппаратуру, принимающую и передающую сигналы.

§ 52 ПРИНЦИПЫ РАДИОСВЯЗИ

Принципы радиосвязи заключаются в следующем. Переменный электрический ток высокой частоты, созданный в передающей антенне, вызывает в окружающем пространстве быстроменяющееся электромагнитное поле, которое распространяется в виде электромагнитной волны. Достигая приемной антенны, электромагнитная волна вызывает в ней переменный ток той же частоты, на которой работает передатчик.

Важнейшим этапом в развитии радиосвязи было создание в 1913 г. генератора незатухающих электромагнитных колебаний. Кроме передачи телеграфных сигналов, состоящих из коротких и более продолжительных импульсов («точки» и «тире») электромагнитных волн, стала возможной надежная и высококачественная *радиотелефонная связь* — передача речи и музыки с помощью электромагнитных волн.

Радиотелефонная связь. При радиотелефонной связи колебания давления воздуха в звуковой волне превращаются с помощью микрофона в электрические колебания той же формы. Казалось бы, если эти колебания усилить и подать в антенну, то можно будет передавать на расстояние речь и музыку с помощью электромагнитных волн.

Однако в действительности такой способ передачи неосуществим. Дело в том, что частота звуковых колебаний мала, а электромагнитные волны низкой (звуковой) частоты имеют малую интенсивность.

Модуляция. Для осуществления радиотелефонной связи необходимо использовать высокочастотные колебания, интенсивно излучаемые антенной. Незатухающие гармонические колебания высокой частоты вырабатывает генератор, например генератор на транзисторе.

Для передачи звука эти высокочастотные колебания изменяют, или, как говорят, *модулируют*, с помощью электрических колебаний низкой (звуковой) частоты. Можно, например, изменять со звуковой частотой амплитуду высокочастотных колебаний. Этот способ называют амплитудной модуляцией.

На рисунке 7.8 приведены три графика: а) график колебаний высокой частоты, которую называют несущей частотой; б) график колебаний звуковой частоты, т. е. модулирующих колебаний; в) график модулированных по амплитуде колебаний.

Без модуляции мы в лучшем случае можем контролировать лишь, работает станция или молчит. Без модуляции нет ни телефонной, ни телевизионной передачи.

Модуляция — медленный процесс. Это такие изменения в высокочастотной колебательной системе, при которых она успевает совершить очень много высокочастотных колебаний, прежде чем их амплитуда изменится заметным образом.

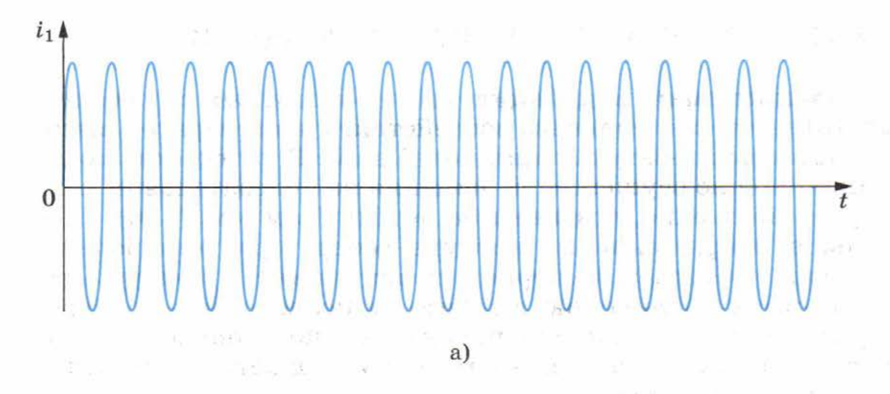
Детектирование. В приемнике из модулированных колебаний высокой частоты выделяются низкочастотные колебания. Такой процесс преобразования сигнала называют *детектированием*.

Полученный в результате детектирования сигнал соответствует тому звуковому сигналу, который действовал на микрофон передатчика. После усиления колебания низкой частоты могут быть превращены в звук.

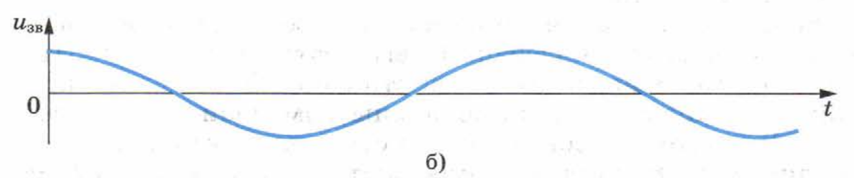
Основные принципы радиосвязи представлены в виде блок-схемы на рисунке 7.9.



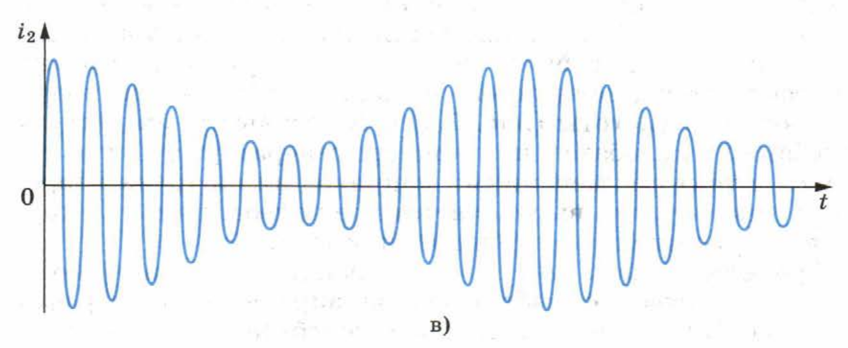
1. **Для чего нужна модуляция колебаний?**
2. **Что называют детектированием колебаний?**



а)



б)



в)

Рис. 7.8

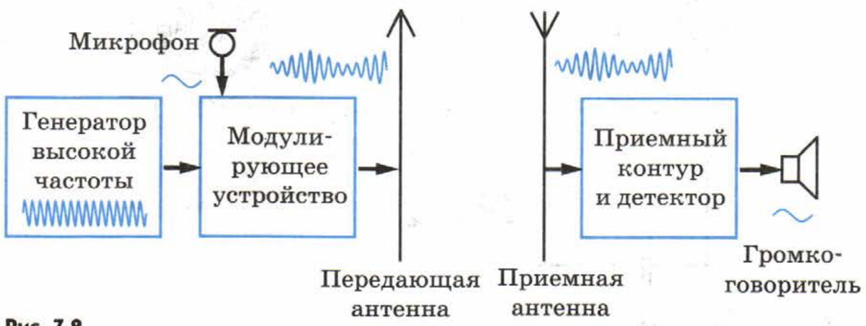


Рис. 7.9

§ 53 МОДУЛЯЦИЯ И ДЕТЕКТИРОВАНИЕ

Амплитудная модуляция высокочастотных колебаний достигается специальным воздействием на генератор высокочастотных незатухающих колебаний. В частности, модуляцию можно осуществить, изменяя на колебательном контуре напряжение, создаваемое источником (см. § 36). Чем больше напряжение на контуре генератора, тем больше энергии поступает за период от источника в контур. Это приводит к увеличению амплитуды колебаний в контуре. При уменьшении напряжения энергия, поступающая в контур, также уменьшается. Поэтому уменьшается и амплитуда колебаний в контуре.

Если менять напряжение на контуре с частотой, много меньшей частоты колебаний, вырабатываемых генератором, то изменения амплитуды этих колебаний будут приближенно прямо пропорциональны изменениям напряжения. В самом простом устройстве для осуществления амплитудной модуляции включают последовательно с источником постоянного напряжения дополнительный источник переменного напряжения низкой частоты. Этим источником может быть, например, вторичная обмотка трансформатора, если по его первичной обмотке проходит ток звуковой частоты (рис. 7.10). В результате амплитуда колебаний в колебательном контуре генератора будет изменяться в такт с изменениями напряжения на транзисторе. Это и означает, что высокочастотные колебания модулируются по амплитуде низкочастотным сигналом.

Временну́ю развертку модулированных колебаний можно непосредственно наблюдать на экране осциллографа, если подать на него напряжение с колебательного контура.

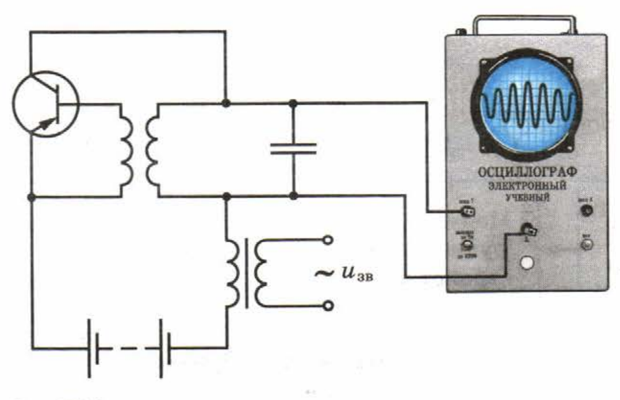


Рис. 7.10

Кроме *амплитудной модуляции*, в некоторых случаях применяют *частотную модуляцию* — изменение частоты колебаний в соответствии с управляющим сигналом. Ее преимуществом является бóльшая устойчивость по отношению к помехам.

Детектирование. Принятый приемником модулированный высокочастотный сигнал даже после усиления не способен непосредственно вызвать колебания мембраны телефона или рупора громкоговорителя со звуковой частотой. Он может вызвать только высокочастотные колебания, не воспринимаемые нашим ухом. Поэтому в приемнике необходимо сначала из высокочастотных модулированных колебаний выделить сигнал звуковой частоты, т. е. провести *детектирование*.

Детектирование осуществляется устройством, содержащим элемент с односторонней проводимостью — *детектор*. Таким элементом может быть полупроводниковый диод.

Рассмотрим принцип работы полупроводникового детектора. Пусть этот прибор включен в цепь последовательно с источником модулированных колебаний и нагрузкой (рис. 7.11). Ток в цепи будет идти преимущественно в одном направлении, отмеченном на рисунке стрелкой, так как сопротивление диода в прямом направлении много меньше, чем в обратном. Мы вообще можем пренебречь обратным током и считать, что диод обладает односторонней проводимостью. Вольт-амперную характеристику диода приближенно можно представить в виде ломаной, состоящей из двух прямолинейных отрезков (рис. 7.12).

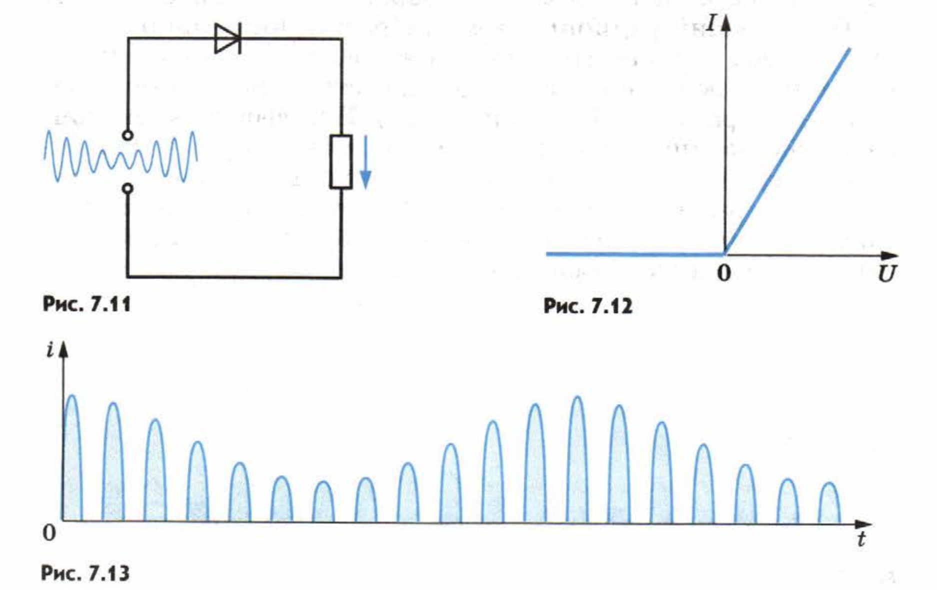


Рис. 7.11

Рис. 7.12

Рис. 7.13

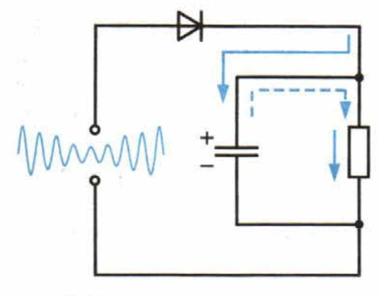


Рис. 7.14

В цепи (см. рис. 7.11) будет идти пульсирующий ток, график силы тока которого показан на рисунке 7.13. Этот пульсирующий ток сглаживается с помощью *фильтра*. Простейший фильтр представляет собой конденсатор, присоединенный к нагрузке (рис. 7.14).

Фильтр, работает так. В те моменты времени, когда диод пропускает ток, часть его проходит через нагрузку, а другая часть тока ответвляется в конденсатор, заряжая его (сплошные стрелки на рисунке 7.14). Разветвление тока уменьшает пульсации тока, проходящего через нагрузку. Зато в промежутке между импульсами, когда диод заперт, конденсатор частично разряжается через нагрузку. Поэтому в интервале между импульсами ток через нагрузку идет в ту же сторону (штриховые стрелки на рисунке 7.14). Каждый новый импульс подзаряжает конденсатор. В результате этого через нагрузку идет ток звуковой частоты, форма колебаний которого почти точно воспроизводит форму низкочастотного сигнала на передающей станции (рис. 7.15).

Более сложные фильтры сглаживают небольшие высокочастотные пульсации, и колебания звуковой частоты происходят более плавно, чем это изображено на рисунке 7.15.

Простейший радиоприемник. Простейший радиоприемник состоит из колебательного контура, связанного с антенной, и подключенной к нему цепи, состоящей из детектора, конденсатора и телефона (рис. 7.16). В колебательном контуре радиоволной возбуждаются модулированные колебания. Катушки телефонов выполняют роль нагрузки. Через них идет ток звуковой частоты. Небольшие пульсации высокой частоты не сказываются заметно на колебаниях мембраны и не воспринимаются на слух.

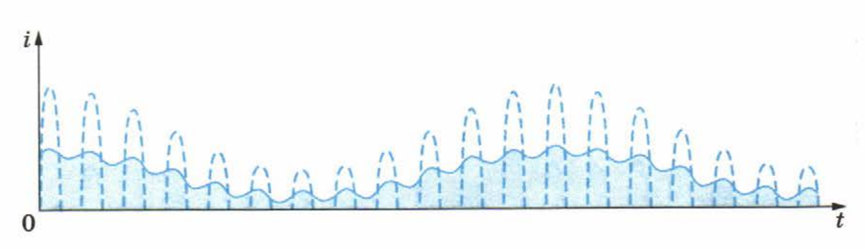


Рис. 7.15

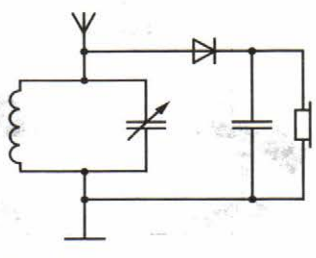


Рис. 7.16

Модулировать можно амплитуду или частоту колебаний. Проще всего осуществляется амплитудная модуляция.

При детектировании переменный ток выпрямляется и высокочастотные пульсации сглаживаются фильтром.



1. От чего зависит амплитуда автоколебаний в генераторе на транзисторе?
2. Как устроен простейший детекторный радиоприемник?

§ 54 СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Современные радиотехнические устройства позволяют провести очень наглядные опыты по наблюдению свойств электромагнитных волн. При этом лучше всего пользоваться волнами сантиметрового диапазона. Эти волны излучаются специальным генератором сверхвысокой частоты (СВЧ). Электрические колебания генератора модулируют звуковой частотой. Принятый сигнал после детектирования подается на громкоговоритель.

Электромагнитные волны излучаются рупорной антенной в направлении оси рупора. Приемная антенна в виде такого же рупора улавливает волны, которые распространяются вдоль его оси. Общий вид установки изображен на рисунке 7.17.

Поглощение электромагнитных волн. Располагают рупоры друг против друга и, добившись хорошей слышимости звука в громкоговорителе, помещают между рупорами различные диэлектрические тела. При этом замечают уменьшение громкости.

Отражение электромагнитных волн. Если диэлектрик заменить металлической пластиной, то звук перестанет быть

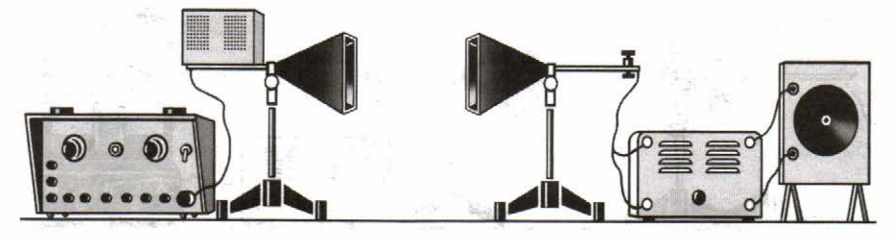


Рис. 7.17

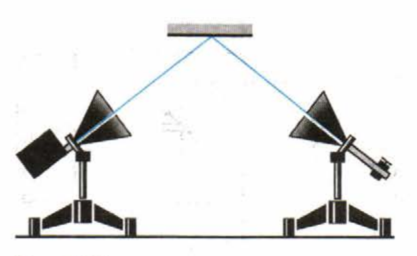


Рис. 7.18

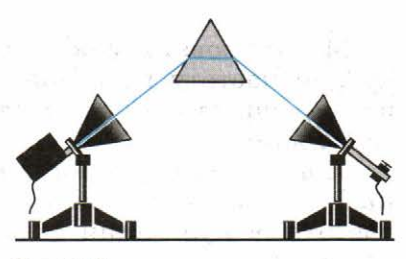


Рис. 7.19

слышимым. Волны не достигают приемника вследствие отражения. Отражение происходит под углом, равным углу падения, как и в случае световых и механических волн. Чтобы убедиться в этом, рупоры располагают под одинаковыми углами к большому металлическому листу (рис. 7.18). Звук исчезнет, если убрать лист или повернуть его.

Преломление электромагнитных волн. Электромагнитные волны изменяют свое направление (преломляются) на границе диэлектрика. Это можно обнаружить с помощью большой треугольной призмы из парафина. Рупоры располагают под углом друг к другу, как и при демонстрации отражения. Металлический лист заменяют затем призмой (рис. 7.19). Убирая призму или поворачивая ее, наблюдают исчезновение звука.

Поперечность электромагнитных волн. Электромагнитные волны являются поперечными. Это означает, что векторы $\vec{E}$ и $\vec{B}$ электромагнитного поля волны перпендикулярны направлению ее распространения. При этом векторы $\vec{E}$ и $\vec{B}$ взаимно перепендикулярны. Волны с определенным направлением колебаний этих векторов называются поляризованными. На рисунке 7.1 изображена такая поляризованная волна.

Приемный рупор с детектором принимает только поляризованную в определенном направлении волну. Это можно обнаружить, повернув передающий или приемный рупор на 90°. Звук при этом исчезает.

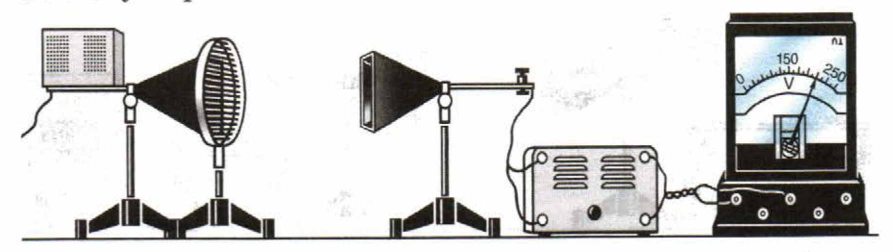


Рис. 7.20

Поляризацию наблюдают, помещая между генератором и приемником решетку из параллельных металлических стержней (рис. 7.20). Решетку располагают так, чтобы стержни были горизонтальными или вертикальными. При одном из этих положений, когда электрический вектор параллелен стержням, в них возбуждаются токи, в результате чего решетка отражает волны, подобно сплошной металлической пластине. Когда же вектор $\vec{E}$ перпендикулярен стержням, токи в них не возбуждаются и электромагнитная волна проходит через решетку.

Электромагнитные волны обладают следующими свойствами. Они поглощаются, отражаются, испытывают преломление, поляризуются. Последнее свойство свидетельствует о поперечности этих волн.



1. **Перечислите известные вам свойства электромагнитных волн.**
2. **Какая волна называется поляризованной?**

§ 55 РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

При использовании электромагнитных волн для радиосвязи как источник, так и приемник радиоволн чаще всего располагают вблизи земной поверхности. Форма и физические свойства земной поверхности, а также состояние атмосферы сильно влияют на распространение радиоволн.

Особенно существенное влияние на распространение радиоволн оказывают слои ионизированного газа в верхних частях атмосферы на высоте 100—300 км над поверхностью Земли. Эти слои называют *ионосферой*. Ионизация воздуха верхних слоев атмосферы вызывается электромагнитным излучением Солнца и потоком заряженных частиц, излучаемых им. Проводящая электрический ток ионосфера отражает радиоволны с длиной волны $\lambda > 10$ м как обычная металлическая пластина. Но способность ионосферы отражать и поглощать радиоволны существенно меняется в зависимости от времени суток и времен года[1].

Устойчивая радиосвязь между удаленными пунктами на земной поверхности вне прямой видимости оказывается возможной из-за способности радиоволн *огибать* выпуклую земную поверхность (явление *дифракции*). Это огибание выражено тем сильнее, чем больше длина волны. Поэтому ра-

[1] Именно по этой причине радиосвязь, особенно в диапазоне средних длин волн (100—1000 м), гораздо надежнее ночью и в зимнее время.

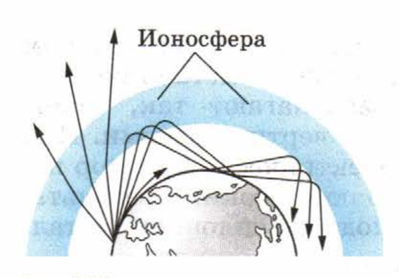


Рис. 7.21

диосвязь на больших расстояниях за счет огибания волнами Земли оказывается возможной лишь при длинах волн, значительно превышающих 100 м (*средние* и *длинные волны*).

Короткие волны (диапазон длин волн от 10 до 100 м) распространяются на большие расстояния только за счет многократных отражений от ионосферы и поверхности Земли (рис. 7.21). Радиоволны в этом диапазоне оказываются «запертыми» в тонком слое, ограниченном поверхностью Земли и ионосферой. В результате волны, излучаемые радиостанцией, расположенной, например, в центре Азии, достигают радиоприемников в Южной Америке.

Длинные радиоволны для этой цели менее пригодны из-за значительного поглощения поверхностными слоями Земли и ионосферой. И все же наиболее надежная радиосвязь на ограниченных расстояниях при достаточной мощности передающей радиостанции обеспечивается на длинных волнах.

Ультракороткие радиоволны ($\lambda < 10$ м) проникают сквозь ионосферу и почти не огибают поверхность Земли. Поэтому они используются для радиосвязи между пунктами в пределах прямой видимости, а также для связи с космическими кораблями.

Для космической радиосвязи используются спутники связи, сигналы которым посылаются передатчиком с Земли. Спутник принимает сигнал и посылает его другой наземной станции, находящейся на огромном расстоянии от первой. Принятые сигналы усиливаются и посылаются приемникам других станций.

В последнее время сделано много попыток обнаружения других цивилизаций и передачи им сигналов. Отправлены сообщения с больших радиотелескопов, в которых содержатся формулировки математических теорем, физических законов, сведения о человеке и т. д. Однако можно сказать, что наиболее мощным сигналом, переданным во Вселенную, является колоссальный рост интенсивности радиоизлучения вследствие развития на Земле телевидения и сотовой связи. Земля из ненаблюдаемого с других звезд объекта превратилась в яркую радиозвезду, непрерывно излучающую мощный поток радиоволн.

Принцип сотовой связи. Сотовая телефонная связь основана на компьютерных системах, которые связывают номера абонентов и адреса наиболее близких ретрансляторов. Во

время соединения компьютерная система находит оптимальный путь связи абонентов — последовательность передачи сигналов через выбранные ретрансляторы. Сотовый телефон абонента постоянно принимает сигнал ретранслятора, с которым он связан. При перемещении абонента происходит перерегистрация — привязка абонента к новому, ближайшему ретранслятору.

Распространение радиоволн существенно зависит от их длины волны. Короткие волны (с длиной волны от 10 до 100 м) многократно отражаются от ионосферы и поверхности Земли. Длинные волны ($\lambda > 100$ м) «скользят» вдоль поверхности Земли. Ультракороткие радиоволны ($\lambda < 10$ м) проникают сквозь ионосферу.

§ 56 РАДИОЛОКАЦИЯ

Обнаружение и точное определение местонахождения объектов с помощью радиоволн называют *радиолокацией*. Радиолокационная установка — *радиолокатор* (или радар) — состоит из передающей и приемной частей. В радиолокации используют электрические колебания сверхвысокой частоты (10^8—10^{11} Гц). Мощный генератор СВЧ связан с антенной, которая излучает остронаправленную волну. В радиолокаторах, работающих на длинах волн порядка 10 см и меньше, такая волна создается антеннами в виде параболических зеркал. Для волн метрового диапазона антенны имеют вид сложных систем вибраторов. При этом острая направленность излучения получается вследствие сложения волн. Антенна устроена так, что волны, посланные каждым из вибраторов, при сложении взаимно усиливают друг друга лишь в заданном направлении. В остальных направлениях происходит полное или частичное их взаимное гашение.

Отраженная волна улавливается либо той же излучающей антенной, либо другой приемной антенной, тоже остронаправленной. Строгая направленность излучения позволяет говорить о *луче* радиолокатора. Направление на объект и определяется как направление луча в момент приема отраженного сигнала.

Для определения расстояния до цели применяют импульсный режим излучения. Передатчик излучает волны кратковременными импульсами. Длительность каждого импульса составляет миллионные доли секунды, а промежуток между импульсами примерно в 1000 раз больше. Во время пауз принимаются отраженные волны.

Определение расстояния R проводится путем измерения общего времени t прохождения радиоволн до цели и обрат-

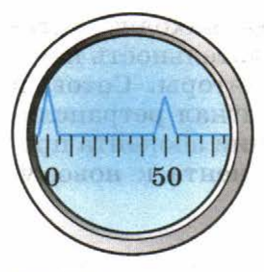


Рис. 7.22

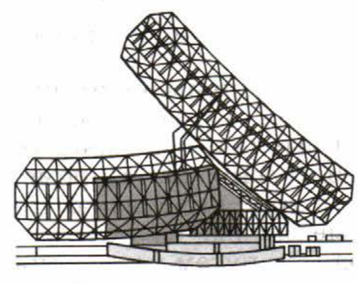
но. Так как скорость радиоволн $c = 3 \cdot 10^8$ м/с в атмосфере практически постоянна на всем пути луча, то

$$R = \frac{ct}{2}.$$

Вследствие рассеяния радиоволн до приемника доходит лишь ничтожная часть той энергии, которую излучает передатчик. Потому приемники радиолокаторов усиливают принятый сигнал в миллионы миллионов раз (10^{12}). Такой чувствительный приемник, разумеется, должен быть отключен на время посылки импульса передатчиком.

Для фиксации посланного и отраженного сигналов используют электронно-лучевую трубку. В момент посылки импульса светлая точка, равномерно движущаяся по экрану электронно-лучевой трубки, отклоняется. На экране появляется всплеск около нулевой отметки шкалы дальности (рис. 7.22). Светящееся пятнышко на экране продолжает равномерно двигаться вдоль шкалы и в момент приема слабого отраженного сигнала снова отклоняется. Расстояние между всплесками на экране пропорционально времени t прохождения сигнала и, следовательно, расстоянию R до цели. Это позволяет проградуировать шкалу непосредственно в километрах.

Радиолокационные установки обнаруживают корабли и самолеты на расстояниях до нескольких сот километров. На их работу лишь незначительно влияют условия погоды и время суток. В больших аэропортах локаторы следят за взлетающими и идущими на посадку самолетами. Наземная служба передает по радио пилотам необходимые указания и таким образом обеспечивает безопасность полетов. Внешний вид аэродромного локатора показан на рисунке 7.23. Корабли и самолеты также снабжены радиолокаторами, служащими для навигационных целей. Такие локаторы создают на экране картину расположения объектов, рассеивающих радиоволны, и оператор видит радиолокационную карту местности.


Рис. 7.23

В настоящее время применение радиолокации становится все более разнообразным. С помощью локаторов наблюдают метеоры в верхних слоях атмосферы. Локаторы используются службой погоды для наблюдения за обла-

ками. Наконец, локаторы используются в космических исследованиях. Каждый космический корабль обязательно имеет на борту несколько радиолокаторов. В 1946 г. в США и Венгрии был осуществлен эксперимент по приему сигнала, отраженного от поверхности Луны. В 1961 г. учеными нашей страны произведена радиолокация планеты Венера, что позволило оценить период ее вращения вокруг своей оси. В настоящее время осуществлена локация и других планет Солнечной системы.

Радиолокаторы используются для обнаружения самолетов и кораблей, в службе погоды, для локации планет и др.



На каких принципах основана работа радиолокатора?

§ 57 ПОНЯТИЕ О ТЕЛЕВИДЕНИИ

Радиоволны используются для передачи не только звука, но и изображения (телевидение).

Принцип передачи изображения на расстоянии состоит в следующем. На передающей станции производится преобразование изображения в последовательность электрических сигналов. Этими сигналами модулируются колебания, вырабатываемые генератором высокой частоты. Модулированная электромагнитная волна переносит информацию на большие расстояния. В приемнике производится обратное преобразование. Высокочастотные модулированные колебания детектируются, а полученный сигнал преобразуется в видимое изображение.

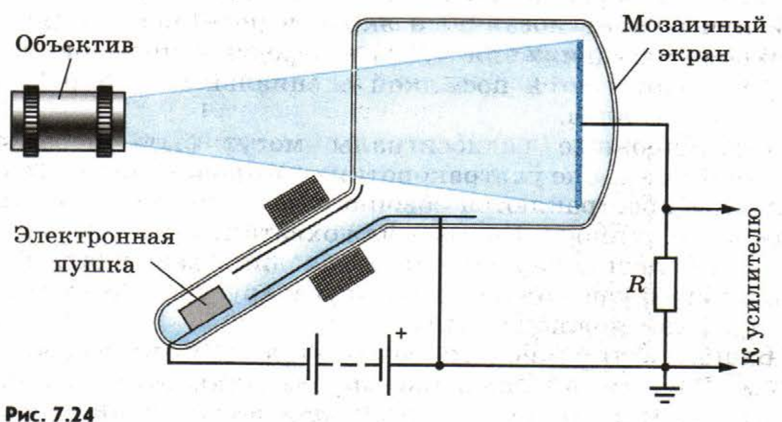


Рис. 7.24

Для передачи движения используется принцип кино: немного отличающиеся друг от друга изображения движущегося объекта (кадры) передаются десятки раз в секунду (в нашем телевидении 50 раз). Изображение кадра преобразуется с помощью передающей вакуумной электронной трубки — *иконоскопа* (рис. 7.24) — в серию электрических сигналов. Кроме иконоскопа существуют и другие передающие устройства.

Внутри иконоскопа расположен мозаичный экран, на который с помощью оптической системы проецируется изображение объекта. Каждая ячейка мозаики заряжается, причем ее заряд зависит от интенсивности падающего на ячейку света. Этот заряд меняется при попадании на ячейку электронного пучка, создаваемого электронной пушкой. Электронный пучок последовательно попадает на все элементы сначала одной строчки мозаики, затем другой строчки и т. д. (всего 625 строк). От того, насколько сильно меняется заряд ячейки, зависит сила тока в резисторе R. Поэтому напряжение на резисторе изменяется пропорционально изменению освещенности вдоль строк кадра.

Высокочастотные сигналы, полученные на выходе трубки, попадают на антенну, излучающую соответствующие электромагнитные волны.

Эти сигналы формируются в телевизионном приемнике после детектирования. Это *видеосигналы*. Они преобразуются в видимое изображение на экране приемной вакуумной электронной трубки — *кинескопа*. Электронная пушка такой трубки снабжена электродом, управляющим числом электронов в пучке и, следовательно, свечением экрана в месте попадания луча. Системы катушек горизонтального и вертикального отклонения заставляют электронный луч обегать весь экран точно таким же образом, как электронный луч обегает мозаичный экран в передающей трубке. Синхронность движения лучей в передающей и приемной трубках достигается посылкой специальных синхронизирующих сигналов.

Телевизионные радиосигналы могут быть переданы только в диапазоне ультракоротких (метровых) волн. Такие волны распространяются обычно лишь в пределах прямой видимости антенны. Поэтому для охвата телевизионным вещанием большой территории необходимо размещать телепередатчики как можно ближе друг к другу и поднимать их антенны как можно выше.

Башня Останкинского телецентра в Москве высотой 540 м обеспечивает надежный прием телепередач в радиусе 120 км. В настоящее время телевизионная сеть в нашей

стране насчитывает несколько тысяч вещательных станций; их передачи принимают около 100 млн телевизоров.

Для получения цветного изображения осуществляется передача трех видеосигналов, несущих компоненты изображения, соответствующие основным цветам (красному, зеленому, синему).

Зона надежного приема телевидения непрерывно увеличивается, в основном за счет использования ретрансляционных спутников.

§ 58 РАЗВИТИЕ СРЕДСТВ СВЯЗИ

Еще сравнительно недавно междугородная телефонная связь осуществлялась исключительно по проводам. При этом на надежность связи влияли грозы и возможность обледенения проводов.

В настоящее время все шире применяются кабельные и радиорелейные линии, повышается уровень автоматизации связи.

В радиорелейных линиях связи используются ультракороткие (дециметровые и сантиметровые) волны. Эти волны распространяются в пределах прямой видимости. Поэтому линии состоят из цепочки маломощных радиостанций, каждая из которых передает сигналы к соседней как бы по эстафете. Такие станции имеют мачты высотой 60—80 м, находящиеся на расстоянии 40—60 км друг от друга.

Все большей популярностью пользуются оптоволоконные линии связи, позволяющие передавать большой объем информации. Процесс передачи основан на многократном отражении лазерного луча, распространяющегося по тонкой трубке (волокну). Такая связь возможна между двумя неподвижными объектами.

Успехи в области космической радиосвязи позволили создать новую систему связи, названную «Орбита». В этой системе используются ретрансляционные спутники связи (рис. 7.25). Спутники связи серии «Молния» запускаются на сильно вытянутые орбиты. Период их обращения составляет около 12 ч.

Созданы мощные и надежные системы, обеспечивающие телевизионным вещанием районы Сибири и Дальнего Востока. Они позволяют осуществить телефонно-телеграфную связь с отдаленными районами нашей страны.

Новые спутники связи серии «Радуга» запускаются на орбиту радиусом около 36 000 км. На этой орбите период обращения спутника равен 24 ч, и поэтому спутник все время находится над одной и той же точкой поверхности Земли.

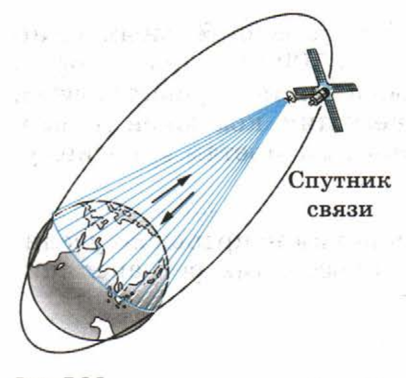


Рис. 7.25

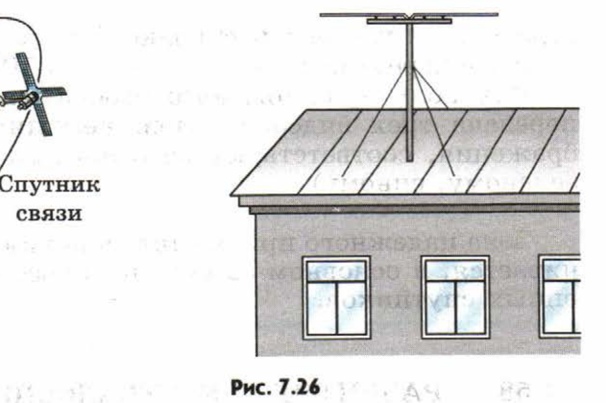


Рис. 7.26

Совершенствуются и находят новые применения и такие сравнительно старые средства связи, как телеграф и фототелеграф.

О размахе достижений, связанных с передачей неподвижных изображений по фототелеграфу можно судить по таким данным: в год по фототелеграфу передаются десятки тысяч газетных полос, с которых печатаются сотни миллионов экземпляров газет. Телевидение охватывает почти все населенные пункты нашей страны.

В нашей стране создается Единая автоматизированная система связи. В связи с этим развиваются, совершенствуются и находят новые области применения различные технические средства связи.



УПРАЖНЕНИЕ 7

1. В схеме радиоприемника, изображенной на рисунке 7.16, $L = 2 \cdot 10^{-4}$ Гн, емкость С переменного конденсатора может меняться от 12 до 450 пФ. На какие длины волн рассчитан этот радиоприемник?

2. На рисунке 7.26 изображена приемная антенна телевизора. Что можно сказать об ориентации колебаний вектора магнитной индукции волны, идущей из телецентра?

3. Имеются ли существенные различия между условиями распространения радиоволн на Луне и на Земле?

КРАТКИЕ ИТОГИ ГЛАВЫ 7

1. В электромагнитной волне происходят колебания напряженности $\vec{E}$ электрического поля и индукции $\vec{B}$ магнитного поля. Векторы $\vec{E}$ и $\vec{B}$ перпендикулярны друг

другу и направлению распространения волны. Электромагнитные волны являются поперечными.

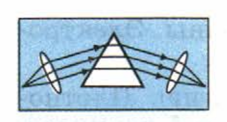
2. Электромагнитные волны переносят энергию. Плотностью потока электромагнитного излучения I называют отношение электромагнитной энергии ΔW, прошедшей за время Δt через поверхность площадью S, перпендикулярную лучам, к произведению площади S на время Δt:

$$I = \frac{\Delta W}{S\Delta t}.$$

Плотность потока электромагнитного излучения источника обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника и прямо пропорциональна четвертой степени частоты колебаний:

$$I \sim \frac{\omega^4}{R^2}.$$

3. Электромагнитные волны отражаются от проводящих поверхностей и преломляются на границе диэлектриков.
4. Впервые электромагнитные волны получил Г. Герц. Основываясь на опытах Герца, А. С. Попов изобрел радио.
5. Радиотелефонная связь осуществляется следующим образом. Высокочастотные колебания, вырабатываемые генератором, модулируются колебаниями низкой (звуковой) частоты. Антенна передающей станции излучает модулированную электромагнитную волну. В радиоприемнике модулированные высокочастотные колебания преобразуются в колебания низкой частоты. Этот процесс называют детектированием.
6. С помощью электромагнитных волн осуществляются радиосвязь, радиовещание, радиолокация, космическая связь, мобильная связь и др.



ОПТИКА

Первые представления древних ученых о свете были весьма наивны. Считалось, что из глаз выходят особые тонкие щупальца и зрительные впечатления возникают при ощупывании ими предметов. Останавливаться подробно на подобных воззрениях сейчас, разумеется, нет необходимости. Мы проследим вкратце за развитием научных представлений о том, что такое свет.

Два способа передачи воздействий. От источника света, например от лампочки, свет распространяется во все стороны и падает на окружающие предметы, вызывая, в частности, их нагревание. Попадая в глаз, свет вызывает зрительные ощущения — мы видим. Можно сказать, что при распространении света происходит передача воздействий от одного тела (источника) к другому (приемнику).

Вообще же действие одного тела на другое может осуществляться двумя способами: либо посредством *переноса вещества* от источника к приемнику, либо же посредством *изменения состояния среды* между телами (без переноса вещества).

Можно, например, заставить звучать струну, ударив по ней, а можно поместить около нее такую же струну, возбудив в ней колебания (рис. 8.1). Тогда звуковые волны второй струны, дойдя до первой, вызовут ее звучание.

Корпускулярная и волновая теории света. В соответствии с двумя способами передачи энергии от источника к приемнику возникли и начали развиваться две совершенно различные теории о том, что такое свет, какова его природа. Причем возникли они почти одновременно в XVII в.

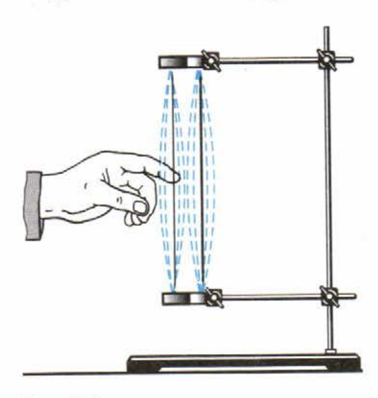


Рис. 8.1

Одна из этих теорий связана с именем Ньютона, другая — с именем Гюйгенса.

Ньютон придерживался так называемой *корпускулярной* теории света, согласно которой свет — это *поток частиц*, идущих от источника во все стороны (перенос вещества).

Согласно же представлениям Гюйгенса свет — это *волны*, распространяющиеся в особой, ги-

потетической среде — эфире, заполняющем все пространство и проникающем внутрь всех тел.

Обе теории длительное время существовали параллельно. Ни одна из них не могла одержать решающей победы. Лишь авторитет Ньютона заставлял большинство ученых отдавать предпочтение корпускулярной теории. Известные в то время из опыта законы распространения света более или менее успешно объяснялись обеими теориями.

На основе корпускулярной теории было трудно объяснить, почему световые пучки, пересекаясь в пространстве, никак не действуют друг на друга. Ведь световые частицы должны сталкиваться и рассеиваться. Волновая же теория это легко объясняла. Волны, например на поверхности воды, свободно проходят друг сквозь друга, не оказывая взаимного влияния.

С другой стороны, прямолинейное распространение света, приводящее к образованию за предметами резких теней, трудно объяснить на основе волновой теории. По корпускулярной же теории прямолинейное распространение света является просто следствием закона инерции.

Такая неопределенность во взглядах на природу света господствовала до начала XIX в., когда были впервые изучены явление огибания светом препятствий (дифракция) и явление усиления или ослабления света при наложении световых пучков друг на друга (интерференция). Эти явления присущи исключительно волновому движению. Объяснить их с помощью корпускулярной теории нельзя. Поэтому казалось, что волновая теория одержала окончательную и полную победу.

Такая уверенность особенно окрепла, когда Максвелл во второй половине XIX в. доказал, что свет — это частный случай электромагнитных волн. Работами Максвелла были заложены основы *электромагнитной теории света*.

После экспериментального обнаружения электромагнитных волн Герцем никаких сомнений в том, что при распространении свет ведет себя как волна, не осталось. Нет их и сейчас.

Однако в начале XX в. представления о природе света начали, тем не менее, коренным образом меняться. Неожиданно выяснилось, что отвергнутая корпускулярная теория все же имеет отношение к действительности. Оказалось, что *при излучении и поглощении свет ведет себя подобно потоку частиц*.

Были обнаружены прерывистые, или, как говорят, квантовые, свойства света. Возникла необычная ситуация: явления интерференции и дифракции по-прежнему можно было объяснить, если считать свет волной, а явления излучения

и поглощения — если считать свет потоком частиц. В этой связи вспомним прежде всего, что нам было известно о свете раньше из курса физики.

Геометрическая и волновая оптика. При первоначальном ознакомлении в курсе физики с оптическими явлениями было введено понятие светового луча, как линии, перпендикулярной фронту волны и указывающей направление, в котором свет переносит энергию.

Геометрической оптикой называется раздел оптики, в котором изучаются законы распространения света в прозрачных средах и законы его отражения от зеркальных поверхностей на основе представления о световом луче. Одним из основных положений геометрической оптики является положение о прямолинейности распространения света. Законы преломления и отражения света были установлены экспериментально задолго до выяснения природы света. Однако они могут быть выведены на основе волновой теории в случае, если длина волны света много меньше размеров препятствий, расположенных не очень далеко от места наблюдения.

Одним из основных положений геометрической оптики является положение о прямолинейности распространения света.

Глава 8. СВЕТОВЫЕ ВОЛНЫ

§ 59 СКОРОСТЬ СВЕТА

Когда мы поворачиваем выключатель, то вся комната сразу же озаряется светом. Кажется, что свету совсем не надо времени, чтобы достигнуть стен. Предпринимались многочисленные попытки определить скорость света. Для этого пытались измерить по точным часам время распространения светового сигнала на большие расстояния (несколько километров). Но эти попытки не дали результата. Начали думать, что распространение света совсем не требует времени, что свет любые расстояния преодолевает мгновенно. Однако оказалось, что скорость света не бесконечно велика, и эта скорость была в конце концов измерена.

Астрономический метод измерения скорости света. Скорость света впервые удалось измерить датскому ученому О. Рёмеру в 1676 г. Рёмер был астрономом, и его успех объясняется именно тем, что он использовал для измерений очень большие, проходимые светом расстояния. Это расстояния между планетами Солнечной системы.

Рёмер наблюдал затмения спутников Юпитера — самой большой планеты Солнечной системы. Юпитер имеет четырнадцать спутников. Ближайший его спутник — Ио — стал предметом наблюдений Рёмера. Он видел, как спутник проходил перед планетой, погружался в ее тень и пропадал из поля зрения. Затем он опять появлялся, как мгновенно вспыхнувшая лампа. Промежуток времени между двумя вспышками оказался равным 42 ч 28 мин. Таким образом, эта «луна» представляла собой громадные небесные часы, через равные промежутки времени посылавшие свои сигналы на Землю.

Вначале измерения проводились в то время, когда Земля при своем движении вокруг Солнца ближе всего подошла к Юпитеру (рис. 8.2). Такие же измерения, проведенные несколько месяцев спустя, когда Земля удалилась от Юпитера, неожиданно показали, что спутник опоздал появиться из тени на целых 22 мин по сравнению с моментом времени, который можно было рассчитать, зная период обращения Ио.

Рёмер объяснял это так: «Если бы я мог остаться на другой стороне земной орбиты, то спутник всякий раз появлялся бы из тени в назначенное время; наблюдатель, находящийся там, увидел бы Ио на 22 мин раньше. Запаздывание в этом случае происходит оттого, что свет употребляет 22 мин на прохождение от места моего первого наблюдения до моего теперешнего положения». Зная время запаздывания появления Ио и расстояние, которым оно вызвано, можно определить скорость света, разделив это расстояние на время запаздывания. Скорость оказалась чрезвычайно большой, примерно 300 000 км/с. Потому-то крайне трудно определить время распространения света между двумя удаленными точками на Земле. Ведь за одну секунду свет проходит расстояние, большее длины земного экватора в 7,5 раза.

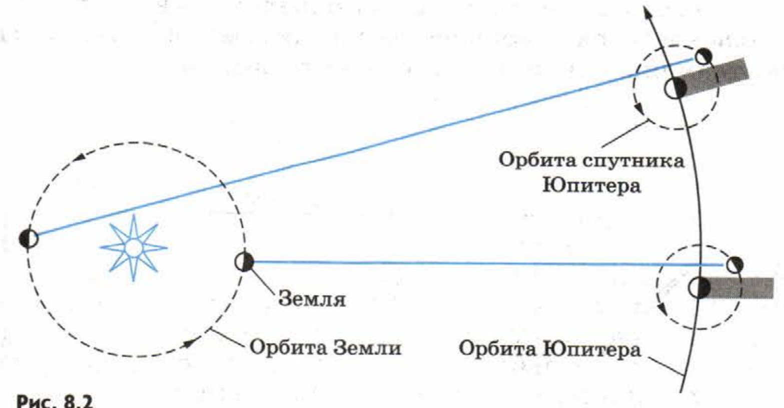


Рис. 8.2

Лабораторные методы измерения скорости света. Впервые скорость света лабораторным методом удалось измерить французскому физику И. Физо в 1849 г.

В опыте Физо свет от источника, пройдя через линзу, падал на полупрозрачную пластинку *1* (рис. 8.3). После отражения от пластинки сфокусированный узкий пучок направлялся на периферию быстровращающегося зубчатого колеса. Пройдя между зубцами, свет достигал зеркала *2*, находящегося на расстоянии нескольких километров от колеса. Отразившись от зеркала, свет, прежде чем попасть в глаз наблюдателя, должен был пройти опять между зубцами. Когда колесо вращалось медленно, свет, отраженный от зеркала, был виден. При увеличении скорости вращения он постепенно исчезал. В чем же здесь дело? Пока свет, прошедший между двумя зубцами, шел до зеркала и обратно, колесо успевало повернуться так, что на место прорези вставал зубец, и свет переставал быть видимым.

При дальнейшем увеличении скорости вращения свет опять становился видимым. Очевидно, что за время распространения света до зеркала и обратно колесо успевало в этом случае повернуться настолько, что на место прежней прорези вставала уже новая прорезь.

Зная это время и расстояние между колесом и зеркалом, можно определить скорость света. В опыте Физо при расстоянии, равном 8,6 км, для скорости света было получено значение 313 000 км/с.

Было разработано еще много других, более точных лабораторных методов измерения скорости света. В частности, американский физик А. Майкельсон разработал весьма совершенный метод определения скорости света с применением вращающихся зеркал.

Была измерена скорость в различных прозрачных средах. Скорость света в воде была определена в 1856 г. Она оказалась в $^4/_3$ раза меньше, чем в вакууме. Во всех других веществах она также меньше, чем в вакууме.

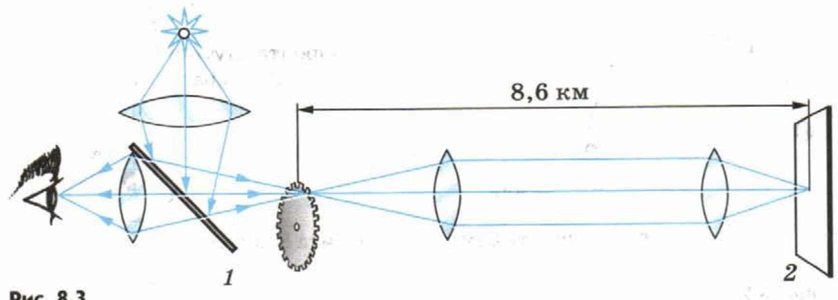


Рис. 8.3

По современным данным, скорость света в вакууме равна 299 792 458 м/с (с точностью до ±1,2 м/с). Приближенно скорость света можно считать равной $3 \cdot 10^8$ м/с. Это значение скорости света нужно обязательно запомнить.

Определение скорости света сыграло в науке очень важную роль. Была не только выяснена природа света, но и установлено, что никакое тело не может двигаться со скоростью, превышающей скорость света в вакууме. Это стало ясно после создания теории относительности, о которой пойдет речь в следующей главе.



В чем состояла основная трудность при измерении скорости света?

§ 60 ПРИНЦИП ГЮЙГЕНСА. ЗАКОН ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА

Законы отражения и преломления света можно вывести из одного общего принципа, описывающего поведение волн. Этот принцип впервые был выдвинут современником Ньютона Христианом Гюйгенсом.

Принцип Гюйгенса. Согласно принципу Гюйгенса ***каждая точка волнового фронта является источником вторичных волн.*** Для того чтобы, зная положение волновой поверхности (фронта волны) в момент времени t, найти ее положение в следующий момент времени $t + \Delta t$, нужно каждую точку фронта рассматривать как источник вторичных волн. Точки M_1, M_2, M_3 и т. д. являются такими источниками. Поверхность, касательная к фронтам вторичных волн, представляет собой фронт первичной волны в следующий момент времени (рис. 8.4). Этот принцип в равной мере пригоден для описания распространения волн любой природы: механических, световых и т. д. Гюйгенс сформулировал его первоначально именно для световых волн.

Для механических волн принцип Гюйгенса имеет наглядное истолкование: частицы среды, до которых доходят колебания, в свою очередь, колеблясь, приводят в движение соседние частицы среды, с которыми они взаимодействуют.

Закон отражения. С помощью принципа Гюйгенса можно вывести закон, на основе которого объясняется отражение волн от границы раздела сред.

Рассмотрим, как происходит отражение плоской волны. Вол-

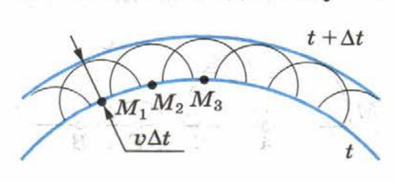


Рис. 8.4



Гюйгенс Христиан (1629—1695) — голландский физик и математик, создатель первой волновой теории света. Основы этой теории изложил в «Трактате о свете» (1690). Впервые использовал маятник для достижения регулярного хода часов и вывел формулу для периода колебаний математического и физического маятников. Его математические работы касались исследования конических сечений, циклоиды и других кривых. Ему принадлежит одна из первых работ по теории вероятности. С помощью усовершенствованной им астрономической трубы открыл спутник Сатурна Титан.

на называется *плоской*, если поверхности равной фазы (волновые поверхности) и соответственно фронт волны представляют собой плоскости. На рисунке 8.5 MN — отражающая поверхность; прямые A_1A и B_1B — два луча падающей плоской волны. Плоскость AC — фронт волны в момент времени, когда луч A_1A дошел до отражающей поверхности.

Угол α между падающим лучом и нормалью к отражающей поверхности в точке падения называют **углом падения.**

Волновую поверхность отраженной волны можно получить, если провести огибающую вторичных волн, центры которых лежат на границе раздела двух сред. Различные участки волновой поверхности AC достигают отражающей границы не одновременно. Возбуждение колебаний в точке A начнется раньше, чем в точке B, на время $\Delta t = \frac{CB}{v}$ (v — скорость волны).

В момент, когда волна достигнет точки B и в этой точке начнется возбуждение колебаний, вторичная волна с центром в точке A уже будет представлять собой полусферу радиусом $r = AD = v\Delta t = CB$. Фронты вторичных волн от источников, расположенных между точками A и B, показаны на рисунке 8.5. Огибающей фронтов вторичных волн является плоскость DB, касательная к сферическим поверхностям. Она и представляет собой фронт отраженной волны. Лучи AA_2 и BB_2 перпендикулярны фронту отраженной волны DB. Угол γ между нормалью к отражающей поверхности и отраженным лучом называют **углом отражения.**

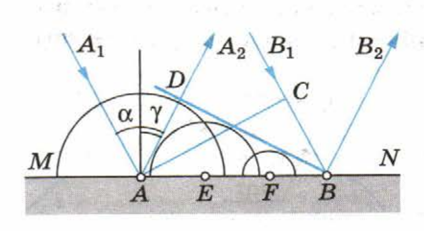


Рис. 8.5

Так как $AD = CB$ и треугольники ADB и ACB прямоугольные, то $\angle DBA = \angle CAB$. Но $\alpha = \angle CAB$ и $\gamma = \angle DBA$ как углы с взаимно перпендикулярными сторонами. Следовательно, ***угол отражения равен углу падения***[1]:

$$\alpha = \gamma. \tag{8.1}$$

Из теории Гюйгенса вытекает закон отражения света: ***луч падающий, луч отраженный и нормаль к отражающей поверхности в точке падения лежат в одной плоскости, причем угол падения равен углу отражения.***

При обратном направлении распространения световых лучей отраженный луч станет падающим, а падающий — отраженным. Обратимость хода световых лучей — их важное свойство.

Сформулирован общий принцип распространения волн любой природы — принцип Гюйгенса. Этот принцип позволяет с помощью простых геометрических построений находить волновую поверхность в любой момент времени по известной волновой поверхности в предшествующий момент. Из принципа Гюйгенса выведен закон отражения света.



1. **Как с помощью закона отражения построить изображение точечного источника света в плоском зеркале?**
2. **Почему нельзя использовать плоское зеркало в качестве киноэкрана?**

§ 61 ЗАКОН ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТА

Напомним, в чем состоит явление преломления света. Выведем затем закон преломления с помощью принципа Гюйгенса.

Наблюдение преломления света. На границе двух сред свет меняет направление своего распространения. Часть световой энергии возвращается в первую среду, т. е. происходит отражение света. Если вторая среда прозрачна, то свет частично может пройти через границу сред, также меняя при этом, как правило, направление распространения.

Это явление называется **преломлением света.**

Вследствие преломления наблюдается кажущееся изменение формы предметов, их расположения и размеров. В этом нас могут убедить простые наблюдения. Положим на дно пустого непрозрачного стакана монету или другой небольшой предмет. Подвинем стакан так, чтобы центр мо-

[1] Здесь и далее в алгебраических соотношениях под словом *угол* подразумевается его радианная (или градусная) мера.

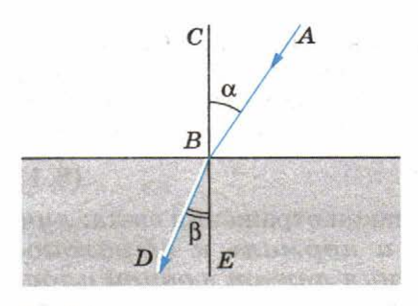



Рис. 8.6

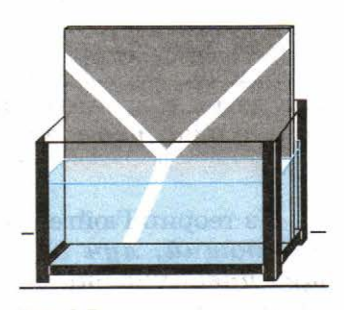


Рис. 8.7

неты, край стакана и глаз находились на одной прямой. Не меняя положения головы, будем наливать в стакан воду. По мере повышения уровня воды дно стакана с монетой как бы приподнимается. Монета, которая ранее была видна лишь частично, теперь будет видна полностью. Установим наклонно карандаш в сосуде с водой. Если посмотреть на сосуд сбоку, то можно заметить, что часть карандаша, находящаяся в воде, кажется сдвинутой в сторону.

Эти явления объясняются изменением направления лучей на границе двух сред — преломлением света.

Закон преломления света определяет взаимное расположение падающего луча AB (рис. 8.6), преломленного луча DB и перпендикуляра CE к поверхности раздела сред, восставленного в точке падения. Угол α называется *углом падения*, а угол β — **углом преломления**.

Падающий, отраженный и преломленный лучи нетрудно наблюдать, сделав узкий световой пучок видимым. Ход такого пучка в воздухе можно проследить, если пустить в воздух немного дыма или же поставить экран под небольшим углом к лучу. Преломленный пучок виден также в подкрашенной флюоресцином воде аквариума (рис. 8.7).

Вывод закона преломления света. Закон преломления света был установлен опытным путем в XVII в. Мы его выведем с помощью принципа Гюйгенса.

Преломление света при переходе из одной среды в другую вызвано различием в скоростях распространения света в той и другой среде. Обозначим скорость волны в первой среде через v_1, а во второй через v_2.

Пусть на плоскую границу раздела двух сред (например, из воздуха в воду) падает плоская световая волна (рис. 8.8). Обозначим через AC фронт волны в тот момент, когда волна достигнет точки A. Луч B_1B достигнет границы раздела двух сред спустя время Δt:

$$\Delta t = \frac{CB}{v_1}.$$

Когда волна достигнет точки B, вторичная волна во второй среде от источника, находящегося в точке A, уже будет иметь вид полусферы радиусом

$$AD = v_2 \Delta t.$$

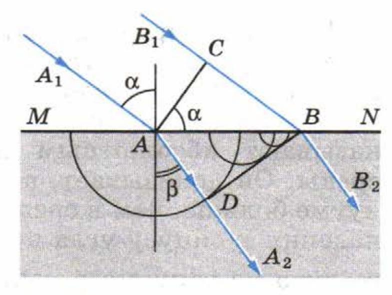


Рис. 8.8

Фронт преломленной волны можно получить, проведя поверхность, касательную ко всем фронтам вторичных волн во второй среде, источники которых находятся на границе раздела сред. В данном случае это плоскость BD. Она является огибающей вторичных волн.

Угол падения α луча A_1A равен углу CAB в треугольнике ABC (углы между двумя взаимно перпендикулярными сторонами). Следовательно,

$$CB = v_1 \Delta t = AB \sin \alpha. \qquad (8.2)$$

Угол преломления β равен углу ABD треугольника ABD. Поэтому

$$AD = v_2 \Delta t = AB \sin \beta. \qquad (8.3)$$

Разделив почленно уравнение (8.2) на уравнение (8.3), получим

$$\boxed{\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = n,} \qquad (8.4)$$

где n — постоянная величина, не зависящая от угла падения.

Сформулируем законы преломления света.

1) ***Падающий луч, преломленный луч и нормаль к границе раздела двух сред в точке падения лежат в одной плоскости.***

2) ***Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для этих двух сред, равная относительному показателю преломления второй среды относительно первой.***

Убедиться в справедливости закона преломления можно экспериментально, измеряя углы падения и преломления и вычисляя отношение их синусов при различных углах падения. Это отношение остается неизменным.

Показатель преломления. Из принципа Гюйгенса не только следует закон преломления, но с помощью этого принципа раскрывается физический смысл показателя преломления. Он равен отношению скоростей света в средах, на границе между которыми происходит преломление:

$$n = \frac{v_1}{v_2}. \qquad (8.5)$$

Если угол преломления β меньше угла падения α, то согласно уравнению (8.4) скорость света во второй среде меньше, чем в первой.

Показатель преломления среды относительно вакуума называют **абсолютным показателем преломления этой среды.** Он показывает, во сколько раз скорость света в вакууме больше, чем в среде, и равен отношению синуса угла падения к синусу угла преломления при переходе светового луча из вакуума в данную среду: $n = \frac{c}{v}$.

Пользуясь формулой (8.5), можно выразить относительный показатель преломления через абсолютные показатели преломления n_1 и n_2 первой и второй сред.

Действительно, так как $n_1 = \frac{c}{v_1}$ и $n_2 = \frac{c}{v_2}$, где c — скорость света в вакууме, то

$$n = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}. \qquad (8.6)$$

Среду с меньшим абсолютным показателем преломления принято называть *оптически менее плотной средой.*

Абсолютный показатель преломления определяется скоростью распространения света в данной среде, которая зависит от физических свойств и состояния среды, т. е. от температуры вещества, его плотности, наличия в нем упругих напряжений. Показатель преломления зависит также и от длины волны λ света. Для красного света он меньше, чем для зеленого, а для зеленого меньше, чем для фиолетового. Поэтому в таблицах значений показателей преломления для разных веществ обычно указывается, для какого света приведено данное значение n и в каком состоянии находится среда. Если таких указаний нет, то это означает, что зависимостью от приведенных факторов можно пренебречь.

В большинстве случаев приходится рассматривать переход света через границу воздух — твердое тело или воздух — жидкость, а не через границу вакуум — среда. Однако абсолютный показатель преломления n_2 твердого или жидкого вещества отличается от показателя преломления того же вещества относительно воздуха незначительно. Так, абсолютный показатель преломления воздуха при нормальных условиях для желтого света равен примерно $n_1 \approx 1{,}000292$. Следовательно,

$$n = \frac{n_2}{n_1} \approx n_2. \qquad (8.7)$$

Значения показателей преломления для некоторых веществ относительно воздуха приведены ниже в таблице (данные относятся к желтому свету).

Вещество	Показатель преломления относительно воздуха
Вода (при 20 °С)	1,33
Кедровое масло (при 20 °С)	1,52
Сероуглерод (при 20 °С)	1,63
Лед	1,31
Каменная соль	1,54
Кварц	1,54
Рубин	1,76
Алмаз	2,42
Различные сорта стекла	от 1,47 до 2,04

Ход лучей в треугольной призме. С помощью закона преломления света можно рассчитать ход лучей в различных оптических устройствах, например в треугольной призме, изготовленной из стекла или другого прозрачного материала.

На рисунке 8.9 изображено сечение стеклянной призмы плоскостью, перпендикулярной ее боковым ребрам. Луч в призме отклоняется к основанию, преломляясь на гранях OA и OB. Угол φ между этими гранями называют **преломляющим углом призмы.** Угол θ отклонения луча зависит от преломляющего угла φ призмы, показателя преломления n материала призмы и угла падения α. Он может быть вычислен с помощью закона преломления (см. формулу (8.4)). При малых углах α и φ $\theta \approx (n - 1)\varphi$, где n — относительный показатель преломления.

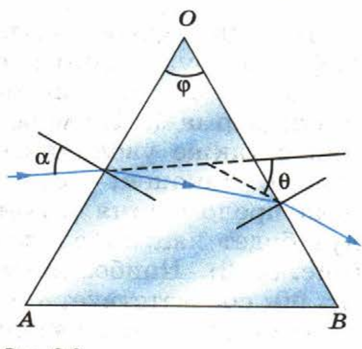


Рис. 8.9

На основе принципа Гюйгенса выведен закон преломления света.



1. Каков физический смысл показателя преломления?
2. Чем отличается относительный показатель преломления от абсолютного?

§ 62 ПОЛНОЕ ОТРАЖЕНИЕ

При прохождении света из оптически менее плотной среды в более плотную, например из воздуха в стекло или воду, $v_1 > v_2$ и, следовательно, согласно закону преломления (см. формулу (8.4)) показатель преломления $n > 1$. По-

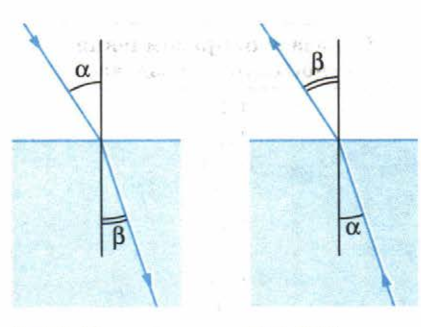


Рис. 8.10 Рис. 8.11



Рис. 8.12

этому $\alpha > \beta$ (рис. 8.10): в результате преломления луч приближается к нормали к границе раздела сред.

Если же направить луч света в обратном направлении — из оптически более плотной среды в оптически менее плотную вдоль ранее преломленного луча (рис. 8.11), то закон преломления можно записать так:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{n}. \qquad (8.8)$$

Преломленный луч по выходе из оптически более плотной среды будет направлен по линии ранее падавшего луча, поэтому $\alpha < \beta$, т. е. преломленный луч отклоняется на сей раз от нормали. По мере увеличения угла α угол преломления β также увеличивается, оставаясь все время больше угла α. Наконец, при некотором угле падения α значение угла преломления β приблизится к 90°, и преломленный луч будет направлен почти по границе раздела двух сред (рис. 8.12). Наибольшему возможному углу преломления $\beta = 90°$ соответствует угол падения α_0.

При $\alpha > \alpha_0$ преломление света невозможно. Значит, луч должен полностью отразиться. Это явление и называется **полным отражением света**.

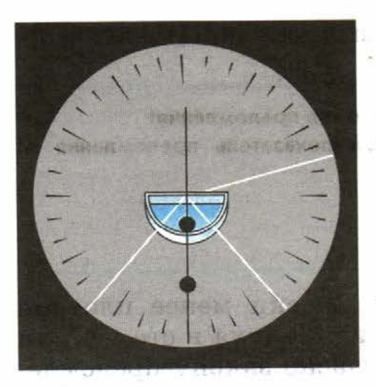


Рис. 8.13

Для наблюдения полного отражения света можно использовать стеклянный полуцилиндр с матовой задней поверхностью. Полуцилиндр закрепляют на диске так, чтобы середина плоской поверхности полуцилиндра совпадала с центром диска (рис. 8.13). Узкий пучок света от осветителя направляют снизу на боковую поверхность полуцилиндра перпендикулярно его поверхности. На этой поверхности луч не прелом-

ляется. На плоской поверхности луч частично преломляется и частично отражается. Отражение происходит в соответствии с законом отражения, а преломление — в соответствии с законом преломления (см. формулу (8.4)).

Если увеличивать угол падения, то можно заметить, что яркость (и следовательно, энергия) отраженного пучка усиливается, в то время как яркость (энергия) преломленного пучка падает. Особенно быстро убывает энергия преломленного пучка, когда угол преломления приближается к 90°. Наконец, когда угол падения становится таким, что преломленный пучок идет вдоль границы раздела двух сред (см. рис. 8.12), доля отраженной энергии составляет почти 100%. Повернем осветитель, увеличив угол падения до α_0. Мы увидим, что преломленный пучок исчез и весь свет отражается от границы раздела двух сред, т. е. происходит полное отражение света.

Угол падения α_0, соответствующий углу преломления 90°, называют **предельным углом полного отражения**. При $\sin\beta = 1$ формула (8.8) принимает вид

$$\sin\alpha_0 = \frac{1}{n}. \qquad (8.9)$$

Из этого равенства и может быть найдено значение предельного угла полного отражения α_0. Для воды ($n = 1{,}33$) оно равно 48°35′, для стекла ($n = 1{,}5$) принимает значение 41°51′, а для алмаза ($n = 2{,}42$) составляет 24°40′. Во всех случаях второй средой является воздух.

Явление полного отражения легко наблюдать на простом опыте. Нальем в стакан воду и поднимем его несколько выше уровня глаз. Поверхность воды, если рассматривать ее снизу сквозь стенку, кажется блестящей, словно посеребренной вследствие полного отражения света.

Явление полного отражения света используют в так называемой *волоконной оптике* для передачи света и изображения по пучкам прозрачных гибких волокон — световодов. Световод представляет собой стеклянное волокно цилиндрической формы, покрытое оболочкой из прозрачного материала с меньшим, чем у волокна, показателем преломления.

За счет многократного полного отражения свет может быть направлен по любому (прямому или изогнутому) пути (рис. 8.14). Волокна собираются в жгуты. При этом по каждому из волокон передается какой-нибудь элемент изображения (рис. 8.15). Жгуты из волокон используются, например, в медицине для исследования внутренних органов.

Согласно формуле (7.6) энергия, переносимая волной, а следовательно, и передаваемый объем информации пропорциональны четвертой степени частоты. Частота же све-

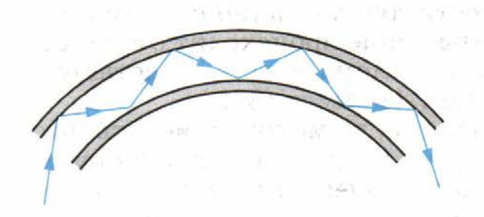


Рис. 8.14

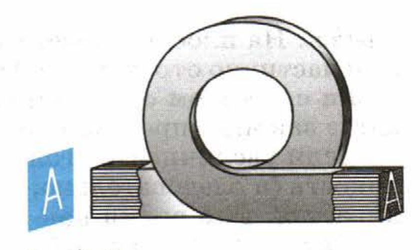


Рис. 8.15

товых волн в 10^5—10^6 раз больше частоты радиоволн. Таким образом, с помощью световых волн можно передавать большой объем информации.

В последнее время волоконная оптика широко используется для быстрой передачи компьютерных сигналов. По волоконному кабелю передается модулированное лазерное излучение.

Полное отражение света показывает, какие богатые возможности для объяснения явлений распространения света заключены в законе преломления. Вначале полное отражение представляло собой лишь любопытное явление. Сейчас оно постепенно приводит к революции в способах передачи информации.



1. **Чему равен предельный угол полного отражения на границе раздела сред алмаз — воздух?**
2. **Как называется телевизионная связь, которая основана на явлении полного отражения?**



ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

1. Плоское зеркало повернули на угол $\alpha = 17°$ вокруг оси, лежащей в плоскости зеркала. На какой угол β повернется отраженный от зеркала луч, если направление падающего луча осталось неизменным?

Решение. Пусть φ — первоначальный угол падения луча (рис. 8.16). По закону отражения угол отражения также равен φ, и, следовательно, угол между падающим лучом и отраженным лучом равен 2φ. При повороте зеркала на угол α перпендикуляр I к зеркалу, восставленный в точке падения, также повернется на угол α и займет положение II. Значит, новый угол падения будет равен $\varphi + \alpha$. Таким же будет и новый угол отражения.

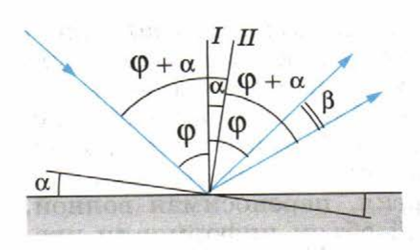


Рис. 8.16

Поэтому угол, на который повернется отраженный луч $\beta = (\varphi + \alpha) + \alpha - \varphi = 2\alpha = 34°$ (см. рис. 8.16).

2. Определите, на какой угол θ отклоняется световой луч от своего первоначального направления при переходе из воздуха в воду, если угол падения $\alpha = 75°$.

Решение. Из рисунка 8.17 видно, что $\theta = \alpha - \beta$. Согласно закону преломления

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n,$$

где n — показатель преломления воды.

Отсюда

$$\sin\beta = \frac{\sin\alpha}{n} \approx 0{,}727.$$

Из таблицы синусов находим: $\beta \approx 46°33'$. Следовательно,

$$\theta \approx 75° - 46°33' = 28°27'.$$

3. Начертите ход лучей сквозь треугольную стеклянную призму, основанием которой является равнобедренный прямоугольный треугольник. Лучи падают на широкую грань перпендикулярно этой грани. Показатель преломления стекла равен 1,5.

Решение. Проходя через широкую грань, лучи не изменяют своего направления, так как угол падения равен нулю (рис. 8.18). На узкой грани AB лучи полностью отражаются, так как угол падения равен 45° и, следовательно, больше предельного угла полного отражения для стекла, равного 42°. После полного отражения от левой грани лучи падают на правую грань, снова полностью отражаются и выходят из призмы по направлению, перпендикулярному широкой грани. Таким образом, направление пучка света изменяется на 180°. Такой ход лучей используется, например, в призматических биноклях.

4. Определите, во сколько раз истинная глубина водоема больше кажущейся, если смотреть по вертикали вниз.

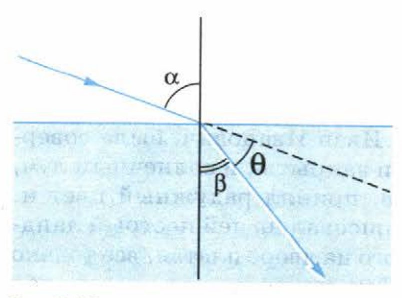


Рис. 8.17

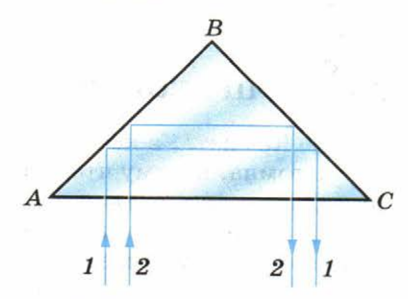


Рис. 8.18

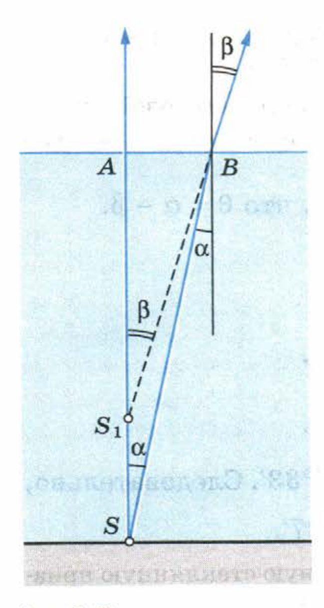


Рис. 8.19

Решение. Построим ход лучей, вышедших из точки S на дне водоема и попавших в глаз наблюдателя (рис. 8.19). Так как наблюдение ведется по вертикали, один из лучей SA направим перпендикулярно поверхности воды, другой SB — под малым углом α к перпендикуляру, восставленному в точке B (при больших углах α лучи не попадут в глаз). Точка S_1 пересечения луча SA и продолжения преломленного луча SB — мнимое изображение точки S.

Угол ASB равен углу падения α (внутренние накрест лежащие углы), а угол AS_1B равен углу преломления β (соответственные углы при параллельных прямых). Прямоугольные треугольники ASB и AS_1B имеют общий катет AB, который можно выразить через истинную глубину водоема $SA = H$ и через кажущуюся глубину $S_1A = h$:

$$AB = H \operatorname{tg} \alpha = h \operatorname{tg} \beta.$$

Отсюда

$$\frac{H}{h} = \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha}.$$

Так как углы α и β малы, то

$$\frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha} \approx \frac{\sin \beta}{\sin \alpha} = n,$$

где n — показатель преломления воды.

Следовательно, $\frac{H}{h} = n$.

Истинная глубина водоема больше кажущейся в $n = 1{,}3$ раза.



УПРАЖНЕНИЕ 8

1. «Комната, в которую вступил Иван Иванович, была совершенно темна, потому что ставни были закрыты, и солнечный луч, проходя в дыру, сделанную в ставне, принял радужный цвет и, ударяясь в противоположную стену, рисовал на ней пестрый ландшафт из крыш, деревьев и развешанного на дворе платья, все только в обращенном виде» (Н. В. Гоголь. «Повесть о том, как поссорился Иван Иванович с Иваном Никифоровичем»). Объясните это явление.

2. Почему тень ног человека на земле от фонаря резко очерчена, а тень головы более расплывчата?

3. На рисунке 8.20 представлена схема опыта Майкельсона по определению скорости света. С какой частотой должна вращаться восьмиугольная зеркальная призма, чтобы источник был виден в зрительную трубу, если световой луч проходит расстояние, примерно равное 71 км?

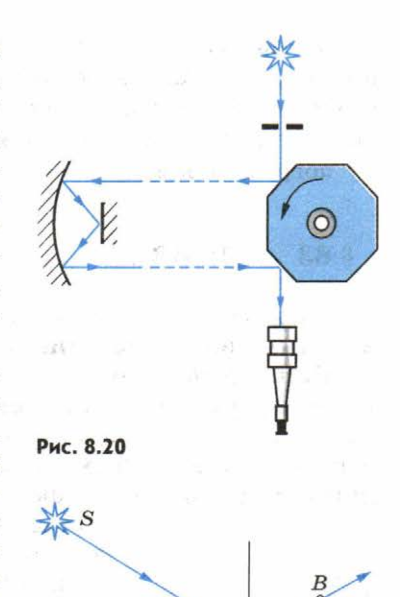


Рис. 8.20

Рис. 8.21

4. Небольшой предмет расположен между двумя плоскими зеркалами, образующими угол $\alpha = 30°$. Предмет находится на расстоянии $l = 10$ см от линии пересечения зеркал и на одинаковом расстоянии от обоих зеркал. Определите расстояние между мнимыми изображениями этого предмета в зеркалах.

5. Луч от точечного источника S падает на плоское зеркало в точке A и, отражаясь, проходит через точку B (рис. 8.21). Докажите, что если бы луч от того же источника прошел через точку B, отразившись от зеркала в точке D, соседней с точкой A, то:

1) не был бы выполнен закон отражения;

2) путь SDB был бы пройден светом за большее время, чем путь SAB.

6. Какой высоты должно быть плоское зеркало, висящее вертикально, чтобы человек, рост которого H, видел себя в нем во весь рост?

7. Вычислите показатель преломления воды относительно алмаза и сероуглерода относительно льда.

8. Сечение призмы представляет собой равносторонний треугольник. Луч проходит сквозь призму, преломляясь в точках, равноотстоящих от вершины (рис. 8.22). Чему равно наибольшее допустимое значение показателя преломления вещества призмы?

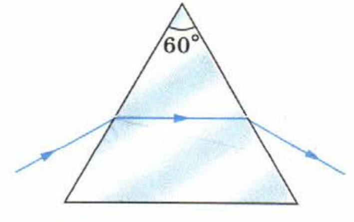


Рис. 8.22

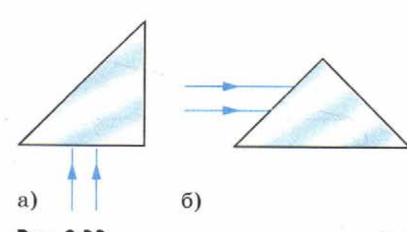


Рис. 8.23

9. Изобразите ход лучей через треугольную стеклянную призму, основанием которой является равнобедренный прямоугольный треугольник. Лучи падают на призму, как показано на рисунке 8.23, *а*, *б*. Останется ли ход лучей таким же, если призму погрузить в воду?

§ 63 ЛИНЗА

Прозрачное тело, ограниченное сферическими поверхностями, называют **линзой.**

Виды линз. Линза может быть ограничена двумя выпуклыми сферическими поверхностями (двояковыпуклая линза — рис. 8.24, *а*), выпуклой сферической поверхностью и плоскостью (плосковыпуклая линза — рис. 8.24, *б*), выпуклой и вогнутой сферическими поверхностями (вогнуто-выпуклая линза — рис. 8.24, *в*). Эти линзы посредине толще, чем у краев, и все они называются **выпуклыми.**

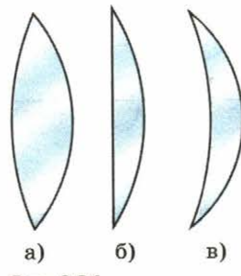


Рис. 8.24

Линзы, которые посредине тоньше, чем у краев, называются **вогнутыми.** На рисунке 8.25 изображены три вида вогнутых линз: двояковогнутая — *а*, плосковогнутая — *б* и выпукло-вогнутая — *в*.

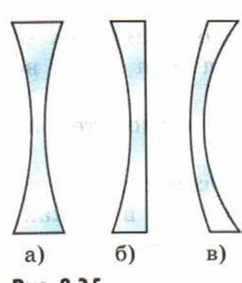


Рис. 8.25

Тонкая линза. Мы рассмотрим наиболее простой случай, когда толщина линзы $l = AB$ пренебрежимо мала по сравнению с радиусами R_1 и R_2 сферических поверхностей линзы (рис. 8.26) и расстоянием предмета от линзы. Такую линзу называют **тонкой линзой.** В дальнейшем, говоря о линзе, мы всегда будем подразумевать тонкую линзу.

Точки *A* и *B* — вершины сферических сегментов — расположены в тонкой линзе столь близко друг от друга, что их можно принять за одну точку, ко-

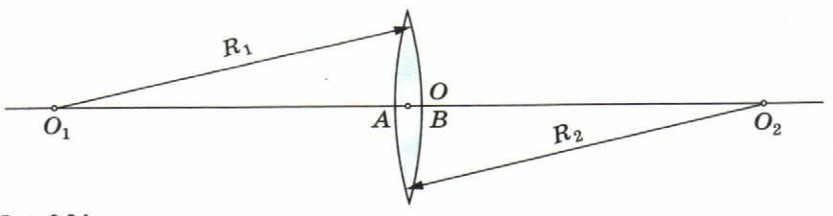


Рис. 8.26

торую называют **оптическим центром линзы** и обозначают буквой *O*. Луч света, который проходит через оптический центр линзы, не изменяет своего направления, а только смещается, но, так как линза тонкая, этим смещением можно пренебречь.

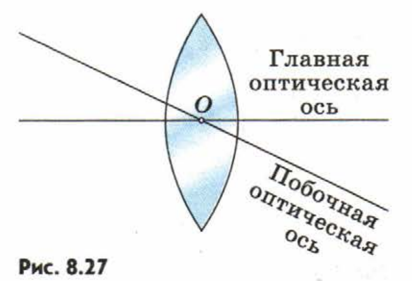


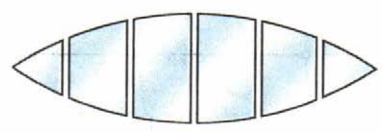
Рис. 8.27

Прямую O_1O_2 (см. рис. 8.26), проходящую через центры сферических поверхностей, которые ограничивают линзу, называют ее **главной оптической осью.** Главная оптическая ось тонкой линзы проходит через оптический центр. Любую другую прямую, проходящую через оптический центр, называют **побочной оптической осью** (рис. 8.27).

Изображение в линзе. Подобно плоскому зеркалу, линза создает изображения источников света. Это означает, что свет, исходящий из какой-либо точки предмета (источника), после преломления в линзе снова собирается в одну точку (изображение) независимо от того, через какую часть линзы прошли лучи. Если по выходе из линзы лучи сходятся, они образуют действительное изображение. В случае же, когда прошедшие через линзу лучи расходятся, то пересекаются в одной точке не сами эти лучи, а лишь их продолжения[1]. Изображение в этом случае мнимое. Его можно наблюдать глазом непосредственно или с помощью оптических приборов.

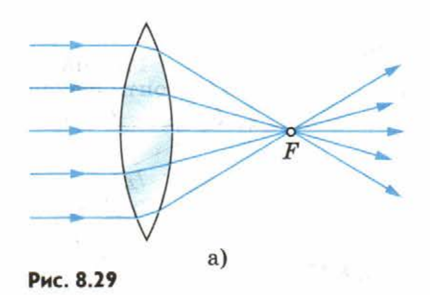
Собирающая линза. Обычно линзы изготавливают из стекла. Выпуклые линзы являются собирающими. Любую из них схематично можно себе представить как совокупность стеклянных призм (рис. 8.28). В воздухе каждая призма отклоняет лучи к основанию. Все лучи, идущие через линзу, отклоняются в сторону ее главной оптической оси.

Точка, в которой пересекаются после преломления в собирающей линзе лучи, падающие на нее параллельно главной оптической оси, называется **главным фокусом линзы.** Эту точку обозначают буквой *F* (рис. 8.29, *а*).


Рис. 8.28

Пучки, параллельные главной оптической оси, можно направить на линзу и с противо-

[1] Лучи или их продолжения будут пересекаться практически в одной точке, если они образуют малые углы с главной оптической осью.



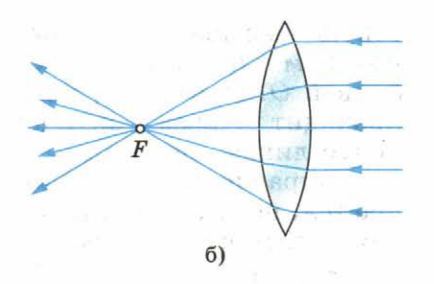


Рис. 8.29

положной стороны. Точка, в которой они сойдутся, пройдя линзу, будет другим главным фокусом (рис. 8.29, *б*).

Таким образом, у линзы два главных фокуса. В однородной среде они располагаются по обе стороны линзы на одинаковых расстояниях от нее. Эти расстояния называются **фокусным расстоянием линзы**; его обозначают буквой F (той же буквой, что и фокус).

Направим три узких параллельных пучка лучей от осветителя под углом к главной оптической оси линзы. Мы увидим, что пересечение лучей произойдет не в главном фокусе, а в другой точке (рис. 8.30, *а*). Но примечательно то, что точки пересечения независимо от углов, образуемых этими пучками с главной оптической осью, располагаются в плоскости, перпендикулярной главной оптической оси линзы и проходящей через главный фокус (рис. 8.30, *б*). Эту плоскость называют **фокальной плоскостью.**

Поместив светящуюся точку в фокусе линзы (или в любой точке ее фокальной плоскости), получим после преломления параллельные лучи (рис. 8.31).

а)

Фокальная плоскость

F

б)

Рис. 8.30

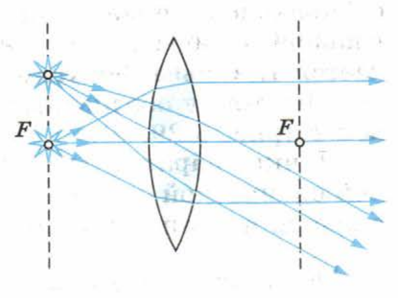


Рис. 8.31

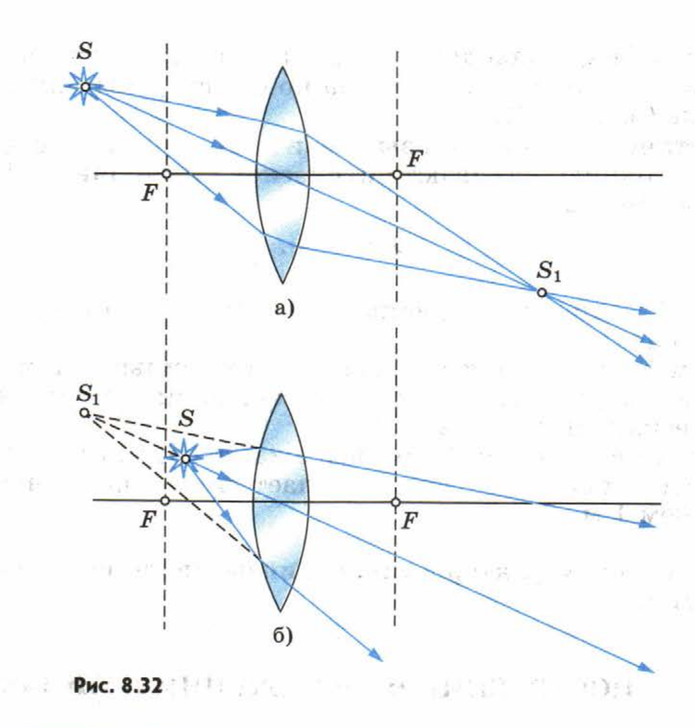


Рис. 8.32

Если сместить источник дальше от фокуса линзы, лучи за линзой становятся сходящимися и дают действительное изображение (рис. 8.32, *а*). Когда же источник находится ближе фокуса, преломленные лучи расходятся и изображение получается мнимым (рис. 8.32, *б*).

Рассеивающая линза. Вогнутые линзы, находящиеся в оптически менее плотной среде (по сравнению с материалом линзы), являются рассеивающими. Направив на такую линзу лучи параллельно главной оптической оси, мы получим расходящийся пучок лучей. Их продолжения пересекаются в главном фокусе рассеивающей линзы.

В этом случае главный фокус является мнимым (рис. 8.33) и расположен на расстоянии F от линзы. Другой мнимый

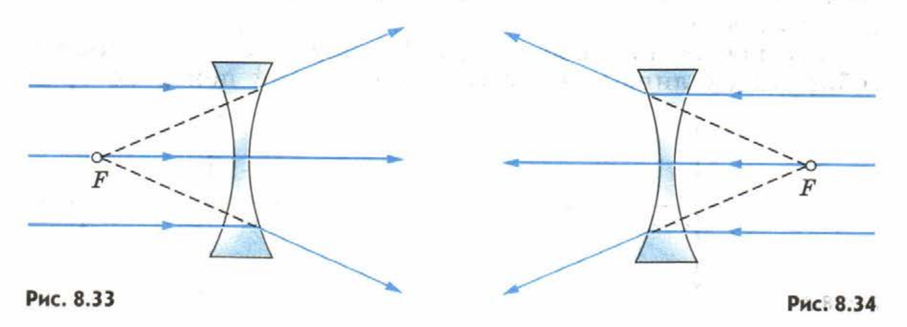


Рис. 8.33

Рис. 8.34

главный фокус находится по другую сторону линзы на таком же расстоянии, если среда по обе стороны линзы одна и та же (рис. 8.34).

Оптическая сила линзы. Величину, обратную фокусному расстоянию, называют **оптической силой линзы.** Ее обозначают буквой D:

$$D = \pm \frac{1}{|F|}.$$

$D > 0$, если линза собирающая, $D < 0$, если линза рассеивающая.

Чем ближе к линзе ее фокусы, тем сильнее линза преломляет лучи, собирая или рассеивая их, и тем больше оптическая сила линзы.

Оптическую силу D линз выражают в *диоптриях* (дптр). Оптической силой в 1 дптр обладает линза с фокусным расстоянием 1 м.

Основной характеристикой линзы является ее оптическая сила.

§ 64 ПОСТРОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ В ЛИНЗЕ

Рассмотрим способы построения изображения в линзе.

Свойства тонкой линзы определяются главным образом расположением ее фокусов. Это означает, что, зная расстояние от источника света до линзы и ее фокусное расстояние (положение фокусов), можно найти расстояние до изображения, не рассматривая ход лучей внутри линзы.

Поэтому нет необходимости изображать на чертеже точный вид сферических поверхностей линзы. Собирающую линзу обозначают символом, показанным на рисунке 8.35, а рассеивающую — символом, приведенным на рисунке 8.36.

Нам уже известно, что все лучи, вышедшие из какой-либо точки предмета, пройдя сквозь линзу, пересекаются также в одной точке. Именно поэтому тонкая линза дает изображение любой точки предмета, а следовательно, и всего предмета в целом.

Для построения изображений, получаемых с помощью собирающей линзы, фокусы и оптический центр которой

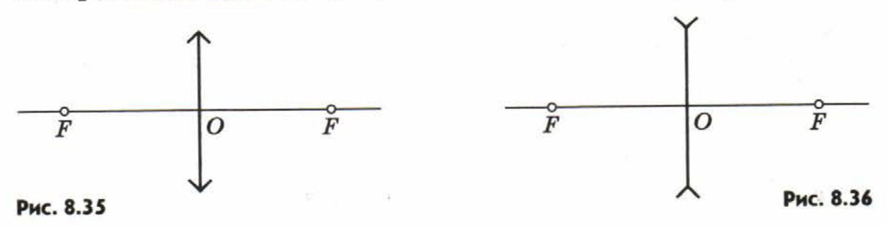


Рис. 8.35

Рис. 8.36

заданы, мы будем пользоваться в основном тремя видами «удобных» лучей. Как было выяснено в предыдущем параграфе, лучи, параллельные главной оптической оси, преломившись в линзе, проходят через ее фокус. Из обратимости хода лучей следует, что лучи, идущие к линзе через ее фокус, после преломления будут направлены параллельно главной оптической оси. Наконец, лучи, проходящие через оптический центр линзы, не меняют своего направления. Они лишь испытывают параллельное смещение, которое в случае тонкой линзы невелико, и им можно пренебречь.

Построим изображение предмета AB (рис. 8.37). Чтобы найти изображение точки A, направим луч AC параллельно главной оптической оси. После преломления он пройдет через фокус линзы. Другой луч — AD можно направить через фокус. После преломления он пройдет параллельно главной оптической оси. В точке пересечения этих двух преломленных лучей будет находиться изображение A_1 точки A. Так же можно построить и все остальные точки изображения. Не следует только думать, что изображение создается двумя или тремя лучами; оно формируется всем бесчисленным множеством лучей, вышедших из точки A и собравшихся в точке A_1. В частности, в точку A_1 попадает луч AOA_1, прошедший через оптический центр O линзы. Таким образом, для построения изображения точки можно использовать любые два из трех «удобных» лучей, ход которых через линзу известен: 1) луч, проходящий через оптический центр; 2) луч, падающий на линзу параллельно главной оптической оси; 3) луч, проходящий через фокус.

Изображение предмета AB в этом случае будет действительным, перевернутым, увеличенным.

Рассмотрим еще случай, когда необходимо построить изображение точки, расположенной на главной оптической оси. Трудность заключается в том, что все три «удобных» луча сливаются в один луч SF, совпадающий с главной оптической осью. Поэтому необходимо определить ход произвольного луча SB (рис. 8.38), попавшего на линзу в точке B.

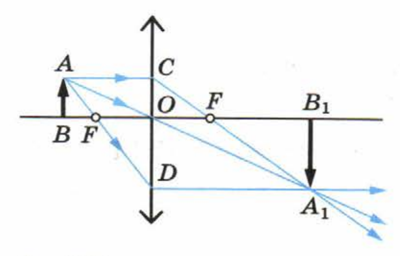


Рис. 8.37

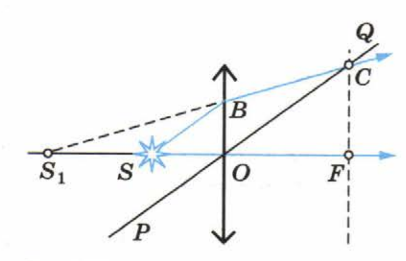


Рис. 8.38

Для построения преломленного луча проведем побочную оптическую ось PQ, параллельную лучу SB. Затем построим фокальную плоскость и найдем точку C пересечения фокальной плоскости с побочной оптической осью. Через эту точку и пройдет преломленный луч BC. Таким образом, построен ход двух лучей, выходящих из точки S. После преломления в линзе эти лучи расходятся. Изображение S_1 точки S будет мнимым, так как источник расположен между фокусом и линзой.

Для построения изображения можно использовать два из трех «удобных» лучей.

§ 65 ФОРМУЛА ТОНКОЙ ЛИНЗЫ. УВЕЛИЧЕНИЕ ЛИНЗЫ

Выведем формулу, связывающую три величины: расстояние d от предмета до линзы, расстояние f от изображения до линзы и фокусное расстояние F.

Из подобия треугольников AOB и A_1B_1O (см. рис. 8.37) следует равенство

$$\frac{BO}{OB_1} = \frac{AB}{A_1B_1}.$$

Из подобия треугольников COF и FA_1B_1 имеем:

$$\frac{CO}{A_1B_1} = \frac{OF}{FB_1}.$$

Так как $AB = CO$, то

$$\frac{AB}{A_1B_1} = \frac{OF}{FB_1}.$$

Отсюда

$$\frac{BO}{OB_1} = \frac{OF}{FB_1},$$

или

$$\frac{d}{f} = \frac{F}{f - F}.$$

Учитывая свойство пропорции, имеем:

$$fF + Fd = fd.$$

Поделив все члены полученного равенства на произведение Ffd, получим

$$\boxed{\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F},} \qquad (8.10)$$

или

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = D. \qquad (8.11)$$

Уравнение (8.10), как и (8.11), принято называть **формулой тонкой линзы**. Величины d, f и F могут быть как положительными, так и отрицательными. Отметим (без доказательства), что, применяя формулу линзы, нужно ставить знаки перед членами уравнения согласно следующему правилу. Если линза собирающая, то ее фокус действительный, и перед членом $\frac{1}{|F|}$ ставят знак «+». В случае рассеивающей линзы $F < 0$ и в правой части формулы (8.10) будет стоять отрицательная величина. Перед членом $\frac{1}{|f|}$ ставят знак «+», если изображение действительное, и знак «–» в случае мнимого изображения. Наконец, перед членом $\frac{1}{|d|}$ ставят знак «+» в случае действительной светящейся точки и знак «–», если она мнимая (т. е. на линзу падает сходящийся пучок лучей, продолжения которых пересекаются в одной точке).

В том случае, когда F, f или d неизвестны, перед соответствующими членами $\frac{1}{F}$, $\frac{1}{f}$ или $\frac{1}{d}$ ставят знак «+». Но если в результате вычислений фокусного расстояния или расстояния от линзы до изображения либо до источника получается отрицательная величина, то это означает, что фокус, изображение или источник мнимые.

Увеличение линзы. Изображение, получаемое с помощью линзы, обычно отличается своими размерами от предмета. Различие размеров предмета и изображения характеризуют *увеличением*.

Линейным увеличением называют отношение линейного размера изображения к линейному размеру предмета.

Для нахождения линейного увеличения обратимся снова к рисунку 8.37. Если высота предмета AB равна h, а высота изображения A_1B_1 равна H, то

$$\Gamma = \frac{H}{h} \qquad (8.12)$$

есть линейное увеличение.

Из подобия треугольников AOB и OA_1B_1 следует, что

$$\frac{H}{h} = \frac{|f|}{|d|}.$$

Следовательно, увеличение линзы равно отношению расстояния от изображения до линзы к расстоянию от линзы до предмета:

$$\Gamma = \frac{|f|}{|d|}. \tag{8.13}$$

Линзы являются основной частью фотоаппарата, проекционного аппарата, микроскопа, телескопа. В глазу тоже есть линза — хрусталик.



1. Какую линзу называют тонкой?

2. Что называется главным фокусом линзы?

3. Какие лучи удобно использовать для построения изображения в линзе?

4. Что называется увеличением линзы?



ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

1. На рисунке 8.39 показано расположение главной оптической оси MN линзы, светящейся точки S и ее изображения S_1. Найдите построением оптический центр линзы и ее фокусы. Определите, собирающей или рассеивающей является эта линза, действительным или мнимым является изображение.

Решение. Луч, проходящий через оптический центр линзы, не отклоняется от своего направления. Поэтому оптический центр O совпадает с точкой пересечения прямых SS_1 и MN (рис. 8.40). Проведем луч SK, параллельный главной оптической оси. Преломленный луч KS_1 пройдет через фокус. Зная, что луч, падающий на линзу через фокус, после преломления идет параллельно главной оптической оси, находим другой фокус. Линза является собирающей, а изображение — действительным.

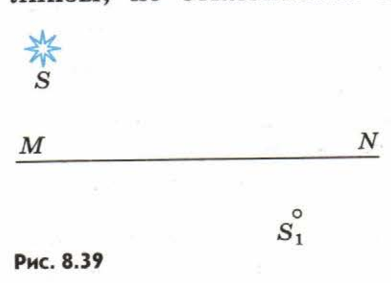


Рис. 8.39

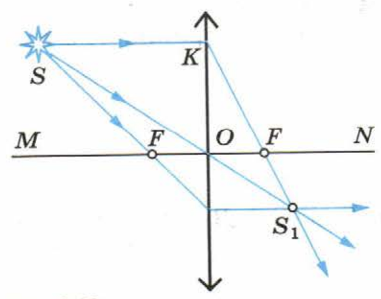


Рис. 8.40

2. Изображение предмета имеет высоту $H = 2$ см. Какое фокусное расстояние F должна иметь линза, расположенная на расстоянии $f = 4$ м от экрана, чтобы изображение данного предмета на экране имело высоту $h = 1$ м?

Решение. Из формулы линзы

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$$

находим фокусное расстояние:

$$F = \frac{fd}{d + f}.$$

Увеличение линзы можно выразить так:

$$\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}.$$

Отсюда

$$d = \frac{hf}{H}.$$

Поэтому

$$F = \frac{hf}{H + h} \approx 8 \text{ (см)}.$$



УПРАЖНЕНИЕ 9

1. С помощью линзы на вертикальном экране получено действительное изображение электрической лампочки. Как изменится изображение, если закрыть верхнюю половину линзы?

2. Фотоаппарат дает на пленке изображение человеческого лица. Поясните с помощью чертежа, почему изображение леса, виднеющегося вдали за человеком, получается нерезким. В какую сторону следует сместить объектив, чтобы лес был изображен четко? Будет ли при этом четким изображение лица?

3. Почему ныряльщик без маски плохо различает предметы под водой?

4. Постройте изображение предмета, помещенного перед собирающей линзой, в следующих случаях: 1) $d > 2F$; 2) $d = 2F$; 3) $F < d < 2F$; 4) $d < F$.

5. На рисунке 8.41 линия ABC изображает ход луча через тонкую рассеивающую линзу. Определите построением положения главных фокусов линзы.

6. Постройте изображение светящейся точки в рассеивающей линзе, используя три «удобных» луча.

7. Светящаяся точка находится в фокусе рассеивающей линзы. На каком расстоянии от линзы находится изображение? Постройте ход лучей.

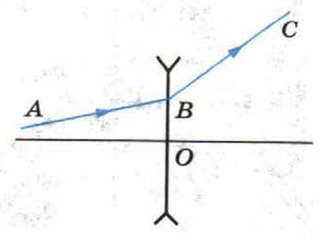


Рис. 8.41

§ 66 ДИСПЕРСИЯ СВЕТА

Занимаясь усовершенствованием телескопов, Ньютон обратил внимание на то, что изображение, даваемое объективом, по краям окрашено. Он заинтересовался этим и первый «исследовал разнообразие световых лучей и проистекающие отсюда особенности цветов, которых до того времени никто даже не подозревал» (слова из надписи на надгробном памятнике Ньютону). Радужную окраску изображения, получаемого с помощью линзы, наблюдали, конечно, и до него. Было замечено также, что радужные края имеют предметы, рассматриваемые через призму. Пучок световых лучей, прошедших через призму, окрашивается по краям.

Опыт Ньютона был гениально прост. Ньютон догадался направить на призму световой пучок малого поперечного сечения. Пучок солнечного света проходил в затемненную комнату через маленькое отверстие в ставне. Падая на стеклянную призму, он преломлялся и давал на противоположной стене удлиненное изображение с радужным чередованием цветов. Стилизованное изображение опыта Ньютона показано на рисунке 8.42. Следуя многовековой традиции, согласно которой радуга считалась состоящей из семи основных цветов, Ньютон тоже выделил семь цветов: фиолетовый, синий, голубой, зеленый, желтый, оранжевый и красный. Саму радужную полоску Ньютон назвал **спектром**.

Закрыв отверстие красным стеклом, Ньютон наблюдал на стене только красное пятно, закрыв синим стеклом — синее пятно и т. д. Это означало, что не призма окрашивает белый свет, как предполагалось раньше. Призма не изменяет свет, а лишь разлагает его на составные части (см. рис. I на цветной вклейке). Белый свет имеет сложный состав. Из него можно выделить пучки различных цветов, и лишь совместное их действие вызывает у нас впечатление белого цвета. В самом деле, если с помощью второй призмы, повернутой на 180° относительно первой, собрать все пучки спектра, то опять получится белый свет (см. рис. II на цветной вклейке). Выделив какую-либо часть спектра, например зеленую, и заставив свет пройти еще через одну призму, мы уже не получим дальнейшего изменения окраски.

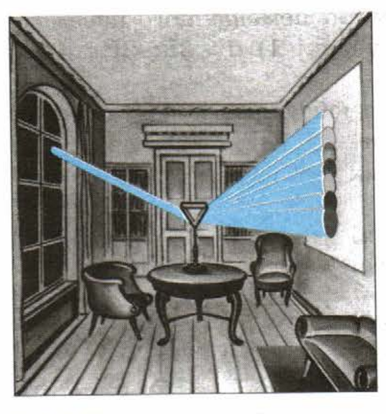


Рис. 8.42

Другой важный вывод, к которому пришел Ньютон, был сформулирован им в трактате «Оптика» следующим образом: «Световые пучки, отличающиеся по цвету, отличаются по степени преломляемости» (для них стекло имеет различные показатели преломления). Наиболее сильно преломляются фиолетовые лучи, меньше других — красные. Зависимость показателя преломления света от его цвета Ньютон назвал **дисперсией**[1].

Показатель преломления зависит и от скорости света в веществе (см. § 61). Абсолютный показатель преломления $n = \frac{c}{v}$. Луч красного цвета преломляется меньше из-за того, что красный свет имеет в веществе наибольшую скорость, а луч фиолетового цвета преломляется больше, так как скорость для фиолетового света наименьшая. Именно поэтому призма и разлагает свет. В пустоте скорости света разного цвета одинаковы. Если бы это было не так, то, к примеру, спутник Юпитера Ио, который наблюдал Рёмер, казался бы красным в момент выхода спутника из тени. Но этого не наблюдается.

Впоследствии была выяснена зависимость цвета от физической характеристики световой волны: ее частоты колебаний ν (или длины волны λ). Поэтому можно дать более глубокое определение дисперсии, чем то, к которому пришел Ньютон. **Дисперсией** называется зависимость показателя преломления среды от частоты световой волны.

Зная, что белый свет имеет сложный состав, можно объяснить удивительное многообразие красок в природе. Если предмет, например лист бумаги, отражает все падающие на него лучи различных цветов, то он будет казаться белым. Покрывая бумагу слоем красной краски, мы не создаем при этом свет нового цвета, но задерживаем на листе некоторую часть имеющегося. Отражаться теперь будут только красные лучи, остальные же поглотятся слоем краски. Трава и листья деревьев кажутся нам зелеными потому, что из всех падающих на них солнечных лучей они отражают лишь зеленые, поглощая остальные. Если посмотреть на траву через красное стекло, пропускающее только красные лучи, то она будет казаться почти черной.

Явление дисперсии, открытое Ньютоном, — первый шаг к пониманию природы цвета. Основательно понять дисперсию смогли лишь после того, как была выяснена зависимость цвета от частоты колебаний (или длины световой волны).

---

[1] От латинского слова dispersio — рассеяние.



1. **На тетради написано красным карандашом «отлично» и зеленым — «хорошо». Имеется два стекла — зеленое и красное. Через какое стекло надо смотреть, чтобы увидеть слово «отлично»?**
2. **Почему только узкий световой пучок дает спектр после прохождения сквозь призму, а у широкого пучка окрашенными оказываются лишь края?**
3. **Что такое дисперсия света?**

§ 67 ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЛН

Любому волновому движению присущи явления интерференции и дифракции, с которыми мы начинаем сейчас знакомиться. Для того чтобы убедиться в том, что свет имеет волновую природу, необходимо было найти экспериментальные доказательства интерференции и дифракции света.

Чтобы лучше понять явление интерференции света, мы вначале остановимся на интерференции механических волн.

Сложение волн. Очень часто в среде одновременно распространяется несколько различных волн. Например, когда в комнате беседуют несколько человек, то звуковые волны накладываются друг на друга. Что при этом происходит?

Проще всего проследить за наложением механических волн, наблюдая волны на поверхности воды. Если мы бросим в воду два камня, образовав тем самым две круговые волны, то можно будет заметить, что каждая волна проходит сквозь другую и ведет себя в дальнейшем так, как будто другой волны совсем не существовало. Точно так же любое число звуковых волн может одновременно распространяться в воздухе, ничуть не мешая друг другу. Множество музыкальных инструментов в оркестре или голосов в хоре создает звуковые волны, одновременно улавливаемые нашим ухом. Причем ухо может отличить один звук от другого.

Теперь посмотрим более внимательно, что происходит в местах, где волны накладываются одна на другую. Наблюдая волны на поверхности воды от двух брошенных в воду камней, можно заметить, что некоторые участки поверхности не возмущены, в других же местах возмущение усилилось. Если две волны встречаются в одном месте своими гребнями, то в этом месте возмущение поверхности воды усиливается. Если же, напротив, гребень одной волны встречается с впадиной другой, то поверхность воды не будет возмущена.

Вообще же в каждой точке среды колебания, вызванные двумя волнами, просто складываются. Результирующее

смещение любой частицы среды представляет собой алгебраическую сумму смещений, которые происходили бы при распространении одной из волн в отсутствие другой.


Рис. 8.43

Интерференция. Сложение в пространстве волн, при котором образуется постоянное во времени распределение амплитуд результирующих колебаний частиц среды, называется **интерференцией**[1].

Выясним, при каких условиях наблюдается интерференция волн. Для этого рассмотрим более подробно сложение волн, образующихся на поверхности воды.

Можно одновременно возбудить две круговые волны в ванне с помощью двух шариков, укрепленных на стержне, которые совершают гармонические колебания (рис. 8.43). В любой точке M на поверхности воды (рис. 8.44) будут складываться колебания, вызванные двумя волнами (от источников O_1 и O_2). Амплитуды колебаний, вызванных в точке M обеими волнами, будут, вообще говоря, различаться, так как волны проходят различные пути d_1 и d_2. Но если расстояние l между источниками много меньше этих путей ($l \ll d_1$ и $l \ll d_2$), то обе амплитуды можно считать практически одинаковыми.

Результат сложения волн, приходящих в точку M, зависит от разности фаз между ними. Пройдя различные расстояния d_1 и d_2, волны имеют разность хода $\Delta d = d_2 - d_1$. Если разность хода равна длине волны λ, то вторая волна запаздывает по сравнению с первой на один период (именно за период волна проходит путь, равный ее длине волны λ). Следовательно, в этом случае гребни (как и впадины) обеих волн совпадают.

Условие максимумов. На рисунке 8.45 изображена зависимость от времени смещений x_1 и x_2, вызванных двумя волнами при $\Delta d = \lambda$. Разность фаз колебаний равна нулю (или, что то же самое, 2π, так как период синуса равен 2π). В результате сложения этих колебаний возникают результирующие колебания с удвоенной амплитудой. Колебания результирующего смещения x на рисунке показаны цветной штриховой

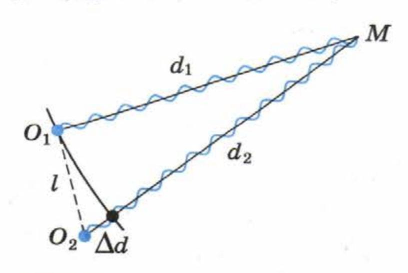


Рис. 8.44

[1] От латинских слов inter — взаимно, между собой и ferio — ударяю, поражаю.

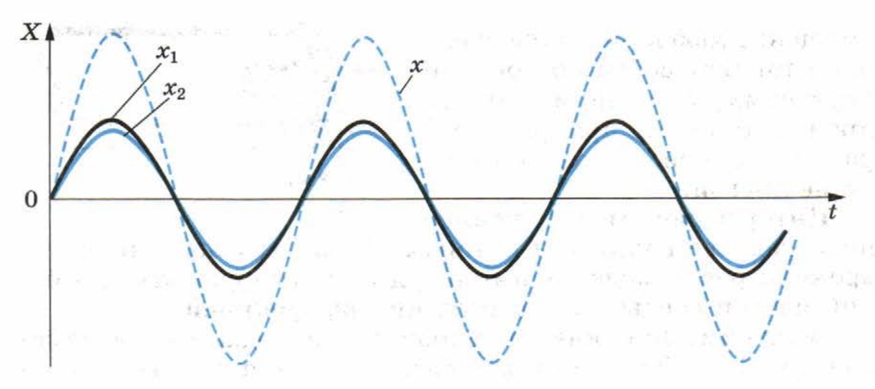


Рис. 8.45

линией. То же самое будет происходить, если на отрезке Δd укладывается не одна, а любое целое число длин волн.

Амплитуда колебаний частиц среды в данной точке максимальна, если разность хода двух волн, возбуждающих колебания в этой точке, равна целому числу длин волн:

$$\Delta d = \pm k\lambda, \tag{8.14}$$

где $k = 0, 1, 2, \ldots$.

Условие минимумов. Пусть теперь на отрезке Δd укладывается половина длины волны. Очевидно, что при этом вторая волна отстает от первой на половину периода. Разность фаз оказывается равной π, т. е. колебания будут происходить в противофазе. В результате сложения этих колебаний амплитуда результирующих колебаний равна нулю, т. е. в рассматриваемой точке колебаний нет (рис. 8.46). То же самое произойдет, если на отрезке укладывается любое нечетное число полуволн.

Амплитуда колебаний частиц среды в данной точке минимальна, если разность хода двух волн, возбуждающих колебания в этой точке, равна нечетному числу полуволн:

$$\Delta d = \pm(2k+1)\frac{\lambda}{2}, \tag{8.15}$$

где $k = 0, 1, 2, \ldots$.

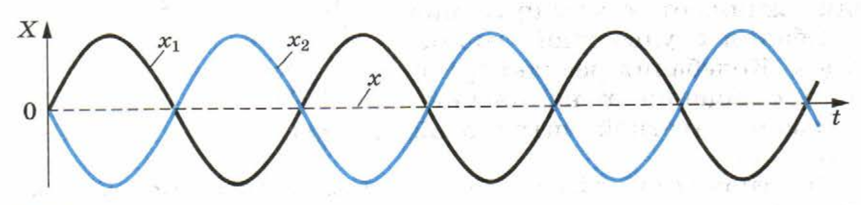


Рис. 8.46

Если разность хода $d_2 - d_1$ принимает промежуточное значение между λ и $\frac{\lambda}{2}$, то и амплитуда результирующих колебаний принимает некоторое промежуточное значение между удвоенной амплитудой и нулем. Но важно то, что амплитуда колебаний в любой точке не меняется с течением времени. На поверхности воды возникает определенное, неизменное во времени распределение амплитуд колебаний, которое называют **интерференционной картиной**. На рисунке 8.47 показана фотография интерференционной картины для двух круговых волн от двух источников (черные кружки). Белые участки в средней части фотографии соответствуют максимумам колебаний, а темные — минимумам.

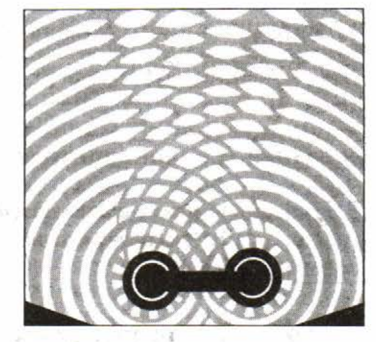


Рис. 8.47

Когерентные волны. Для образования устойчивой интерференционной картины необходимо, чтобы *источники волн имели одинаковую частоту и разность фаз их колебаний была постоянной.*

Источники, соответствующие этим двум условиям, называются **когерентными**[1]. Когерентными называют и созданные ими волны. Только при сложении когерентных волн образуется устойчивая интерференционная картина.

Если же разность фаз колебаний источников не остается постоянной, то в любой точке среды разность фаз колебаний, возбуждаемых двумя волнами, будет меняться с течением времени. Поэтому амплитуда результирующих колебаний с течением времени будет непрерывно изменяться. В результате максимумы и минимумы перемещаются в пространстве, и интерференционная картина размывается.

Распределение энергии при интерференции. Волны несут энергию. Что же с этой энергией происходит при гашении волн друг другом? Может быть, она превращается в другие формы, и в минимумах интерференционной картины выделяется тепло? Ничего подобного!

Наличие минимума в данной точке интерференционной картины означает, что энергия сюда не поступает совсем. Вследствие интерференции происходит перераспределение энергии в пространстве. Она не распределяется равномерно по всем частицам среды, а концентрируется в максимумах за счет того, что в минимумы не поступает вовсе.

[1] От латинского слова cohaereus — взаимосвязанный.

Обнаружение интерференционной картины доказывает, что мы наблюдаем волновой процесс. Волны могут гасить друг друга, а сталкивающиеся частицы никогда не уничтожают друг друга целиком. Интерферируют только когерентные (согласованные) волны.



1. Какие волны называют когерентными?
2. Что называют интерференцией?

§ 68 ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

Если свет представляет собой поток волн, то должно наблюдаться явление интерференции света. Однако получить интерференционную картину (чередование максимумов и минимумов освещенности) с помощью двух независимых источников света, например двух электрических лампочек, невозможно. Включение еще одной лампочки лишь увеличивает освещенность поверхности, но не создает чередования минимумов и максимумов освещенности.

Выясним, в чем причина этого и при каких условиях можно наблюдать интерференцию света.

Условие когерентности световых волн. Причина отсутствия интерференционной картины в опыте с двумя лампочками в том, что световые волны, излучаемые независимыми источниками, не согласованы друг с другом. Для получения же устойчивой интерференционной картины нужны согласованные волны. Они должны иметь одинаковые длины волн и постоянную во времени разность фаз в любой точке пространства. Напомним, что такие согласованные волны с одинаковыми длинами волн и постоянной разностью фаз называются когерентными.

Почти точного равенства длин волн от двух источников добиться нетрудно. Для этого достаточно использовать хорошие светофильтры, пропускающие свет в очень узком интервале длин волн. Но невозможно осуществить постоянство разности фаз от двух независимых источников. Атомы источников излучают свет независимо друг от друга отдельными «обрывками» (цугами) синусоидальных волн, имеющими обычно длину около метра. И такие цуги волн от обоих источников налагаются друг на друга. В результате амплитуда колебаний в любой точке пространства хаотично меняется со временем в зависимости от того, как в данный момент времени цуги волн от различных источников сдвинуты относительно друг друга по фазе. Волны от различных источников света *некогерентны* из-за того, что разность фаз волн

Юнг Томас (1773—1829) — английский ученый с необыкновенной широтой научных интересов и многогранностью дарований. Одновременно известный врач и физик с огромной интуицией, астроном и механик, металлург и египтолог, физиолог и полиглот, талантливый музыкант и даже способный гимнаст. Главными его заслугами являются открытие интерференции света (ввел в физику термин «интерференция») и объяснение явления дифракции на основе волновой теории. Первым измерил длину световой волны.



не остается постоянной[1]. Никакой устойчивой картины с определенным распределением максимумов и минимумов освещенности в пространстве не наблюдается.

Интерференция в тонких пленках. Тем не менее интерференцию света удается наблюдать. Хотя ее и наблюдали очень давно, но только не придавали этому значения.

Вы тоже много раз видели интерференционную картину, когда в детстве развлекались пусканием мыльных пузырей или наблюдали за радужным переливом цветов тонкой пленки керосина либо нефти на поверхности воды. «Мыльный пузырь, витая в воздухе... зажигается всеми оттенками цветов, присущими окружающим предметам. Мыльный пузырь, пожалуй, самое изысканное чудо природы» (Марк Твен). Именно интерференция света делает мыльный пузырь столь достойным восхищения.

Английский ученый Томас Юнг первым пришел к гениальной мысли о возможности объяснения цветов тонких пленок сложением волн *1* и *2* (рис. 8.48), одна из которых (*1*) отражается от наружной поверхности пленки, а другая (*2*) — от внутренней. При этом происходит *интерференция световых волн* — сложение двух волн, вследствие которого наблюдается устойчивая во времени картина усиления или ослабления результирующих световых колебаний в различных точках пространства. Результат интерференции (усиление или ослабление результирующих колебаний) зависит от угла падения света на пленку, ее толщины и длины волны света. Усиление света произойдет в том случае, если преломленная волна *2* отстанет от отраженной волны *1* на целое число длин волн. Если же вторая волна отстанет от первой на половину длины волны или на нечетное число полуволн, то произойдет ослабление света.

---

[1] Исключение составляют квантовые источники света — лазеры, созданные в 1960 г.

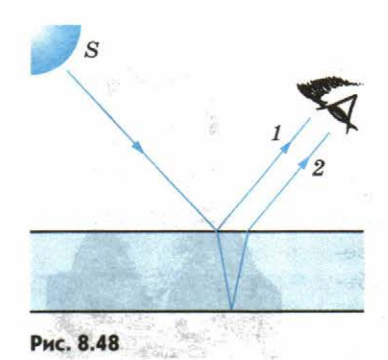


Рис. 8.48

Когерентность волн, отраженных от наружной и внутренней поверхностей пленки, возникает из-за того, что они являются частями одного и того же светового пучка. Цуг волн от каждого излучающего атома разделяется пленкой на два цуга, а затем эти части сводятся вместе и интерферируют.

Юнг понял также, что различие в цвете связано с различием в длине волны (или частоте) световых волн. Световым пучкам различного цвета соответствуют волны с разной длиной волны λ. Для взаимного усиления волн, отличающихся друг от друга длиной волны (углы падения предполагаются одинаковыми), требуется различная толщина пленки. Следовательно, если пленка имеет неодинаковую толщину, то при освещении ее белым светом должны появиться различные цвета.

Кольца Ньютона. Простая интерференционная картина возникает в тонкой прослойке воздуха между стеклянной пластиной и положенной на нее плосковыпуклой линзой, сферическая поверхность которой имеет большой радиус кривизны. Эта интерференционная картина имеет вид концентрических колец, получивших название **колец Ньютона.**

Возьмите плосковыпуклую линзу с малой кривизной сферической поверхности и положите ее выпуклостью вниз на стеклянную пластину. Внимательно разглядывая плоскую поверхность линзы (лучше через лупу), вы обнаружите в месте соприкосновения линзы и пластины темное пятно и вокруг него совокупность маленьких радужных колец (см. рис. III, *1* на цветной вклейке). Это и есть кольца Ньютона. Ньютон наблюдал и исследовал их не только в белом свете, но и при освещении линзы одноцветным (монохроматическим) пучком. Оказалось, что радиусы колец одного и того же порядкового номера увеличиваются при переходе от фиолетового конца спектра к красному; красные кольца имеют максимальный радиус. Расстояния между соседними кольцами уменьшаются с увеличением их радиусов (см. рис. III, *2*, *3* на цветной вклейке).

Удовлетворительно объяснить, почему возникают кольца, Ньютон не смог. Удалось это Юнгу. Проследим за ходом его рассуждений. В их основе лежит предположение о том, что свет — это волны. Рассмотрим случай, когда волна определенной длины волны падает почти перпендикулярно на плосковыпуклую линзу (рис. 8.49). Волна *1* появляется в результате отражения от выпуклой поверхности линзы на

границе сред стекло — воздух, а волна *2* — в результате отражения от пластины на границе сред воздух — стекло. Эти волны когерентны: они имеют одинаковую длину волны и постоянную разность фаз, которая возникает из-за того, что волна *2* проходит больший путь, чем волна *1*. Если вторая волна отстает от первой на целое число длин волн, то, складываясь, волны усиливают друг друга.

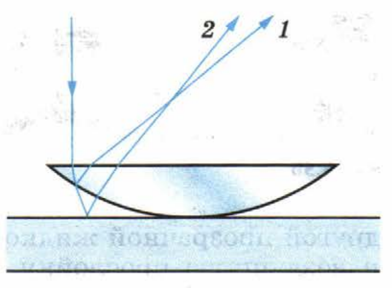


Рис. 8.49

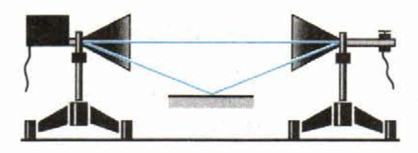
Напротив, если вторая волна отстает от первой на нечетное число полуволн, то колебания, вызванные ими, будут происходить в противоположных фазах, и волны погасят друг друга.

Если известен радиус кривизны R выпуклой поверхности линзы, то можно вычислить, на каких расстояниях от точки соприкосновения линзы со стеклянной пластиной разности хода таковы, что волны определенной длины волны λ, гасят друг друга. Эти расстояния и являются радиусами темных колец Ньютона. Ведь линии постоянной толщины воздушной прослойки представляют собой окружности. Измерив радиусы колец, можно вычислить длины волн.

Длина световой волны. В результате измерений было установлено, что для красного света $\lambda_{кр} = 8 \cdot 10^{-7}$ м, а для фиолетового — $\lambda_ф = 4 \cdot 10^{-7}$ м. Длины волн, соответствующие другим цветам спектра, принимают промежуточные значения. Для любого цвета длина световой волны очень мала. Поясним это на простом примере. Представьте себе среднюю морскую волну длиной волны в несколько метров, которая увеличилась настолько, что заняла весь Атлантический океан от берегов Америки до Европы. Длина световой волны, увеличенной в той же пропорции лишь ненамного превысила бы ширину этой страницы.

Явление интерференции не только доказывает наличие у света волновых свойств, но и позволяет измерить длину волны. Подобно тому как высота звука определяется его частотой, цвет света определяется частотой колебаний или длиной волны.

В природе нет никаких красок, есть лишь волны разных длин волн. Глаз — сложный физический прибор, способный обнаруживать различие в цвете, которому соответствует весьма незначительная (около 10^{-6} см) разница в длинах световых волн. Интересно, что большинство животных не способны различать цвета. Они всегда видят черно-белую карти-


Рис. 8.50

ну. Не различают цвета также дальтоники — люди, страдающие цветовой слепотой.

При переходе света из одной среды в другую длина волны изменяется. Это можно увидеть. Заполним водой или другой прозрачной жидкостью с показателем преломления n воздушную прослойку между линзой и пластиной. Радиусы интерференционных колец уменьшатся.

Почему это происходит? Мы знаем, что при переходе света из вакуума в какую-нибудь среду скорость света уменьшается в n раз. Так как $\upsilon = \lambda\nu$, то при этом должна уменьшиться в n раз либо частота ν, либо длина волны λ. Но радиусы колец зависят от длины волны. Следовательно, когда свет входит в среду, изменяется в n раз именно длина волны, а не частота.

Интерференция электромагнитных волн. В опытах с генератором СВЧ можно наблюдать интерференцию электромагнитных волн (радиоволн) (см. § 54).

Генератор и приемник располагают друг против друга (рис. 8.50). Затем подносят снизу металлическую пластину в горизонтальном положении. Постепенно поднимая пластину, обнаруживают поочередное ослабление и усиление звука.

Явление объясняется следующим образом. Часть волны из рупора генератора попадает непосредственно в приемный рупор. Другая же ее часть отражается от металлической пластины. Меняя расположение пластины, мы изменяем разность хода прямой и отраженной волн. Вследствие этого волны либо усиливают, либо ослабляют друг друга в зависимости от того, равна разность хода целому числу длин волн или нечетному числу полуволн.

Наблюдение интерференции света доказывает, что свет при распространении проявляет волновые свойства. Интерференционные опыты позволяют измерить длину световой волны: она очень мала — от $4 \cdot 10^{-7}$ до $8 \cdot 10^{-7}$ м.



1. **Как получают когерентные световые волны?**
2. **В чем состоит явление интерференции света?**
3. **С какой физической характеристикой световых волн связано различие в цвете?**
4. **После удара камнем по прозрачному льду возникают трещины, переливающиеся всеми цветами радуги. Почему?**
5. **Длина волны света в воде уменьшается в n раз (n — показатель преломления воды относительно воздуха). Означает ли это, что ныряльщик под водой не может видеть окружающие предметы в естественном свете?**

§ 69 НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ

Применения интерференции очень важны и обширны.

Существуют специальные приборы — интерферометры, действие которых основано на явлении интерференции. Назначение их может быть различным: точное измерение длин световых волн, показателя преломления газов и других веществ. Имеются интерферометры специального назначения.

Мы остановимся на двух применениях интерференции.

Проверка качества обработки поверхностей. С помощью интерференции можно оценить качество обработки поверхности изделия с точностью до $^1/_{10}$ длины волны, т. е. с точностью до 10^{-6} см. Для этого нужно создать тонкую клиновидную прослойку воздуха между поверхностью образца и очень гладкой эталонной пластиной. Тогда неровности поверхности размером до 10^{-6} см вызовут заметные искривления интерференционных полос, образующихся при отражении света от проверяемой поверхности и нижней грани.

Просветление оптики. Объективы фотоаппаратов и кинопроекторов, перископы подводных лодок и различные другие оптические устройства состоят из большого числа оптических стекол — линз, призм и др. Проходя через такие устройства, свет отражается от многих поверхностей. Число отражающих поверхностей в современных фотообъективах превышает 10, а в перископах подводных лодок доходит до 40. При падении света перпендикулярно поверхности доля отраженной от нее энергии составляет 5—9% от всей энергии. Поэтому сквозь прибор часто проходит всего 10—20% поступающего в него света. В результате этого освещенность изображения получается слабой. Кроме того, ухудшается качество изображения. Часть светового пучка после многократного отражения от внутренних поверхностей все же проходит через оптический прибор, но рассеивается и уже не участвует в создании четкого изображения. На фотографических изображениях по этой причине образуется «вуаль». Для устранения этих неприятных последствий отражения света от поверхностей оптических стекол надо уменьшить долю отражаемой энергии света. Получаемое с помощью прибора изображение становится при этом ярче, просветляется. Отсюда и происходит термин *просветление оптики*.

Просветление оптики основано на явлении интерференции. На поверхность оптического стекла, например линзы, наносят тонкую пленку с показателем преломления $n_п$, меньшим показателя преломления стекла $n_с$. Для простоты рассмотрим случай нормального падения света на пленку.

Для упрощения понимания на рисунке 8.51 показан ход луча, падающего на поверхность раздела под небольшим углом α, однако все вычисления делаем для $\alpha = 0$.

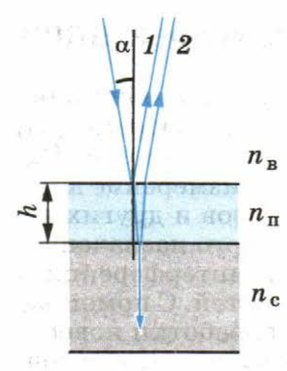


Рис. 8.51

Разность хода световых волн *1* и *2* (см. рис. 8.51), отраженных от верхней и нижней поверхностей пленки, равна удвоенной толщине пленки $2h$. Длина волны $\lambda_п$ в пленке меньше длины волны λ в вакууме в $n_п$ раз:

$$\lambda_п = \frac{\lambda}{n_п}.$$

Для того чтобы волны *1* и *2* ослабляли друг друга, разность хода должна быть равна половине длины волны в пленке:

$$2h = \frac{\lambda_п}{2} = \frac{\lambda}{2n_п}. \quad (8.16)$$

Если амплитуды обеих отраженных волн одинаковы или очень близки друг к другу, то гашение света будет полным. Чтобы добиться этого, подбирают соответствующим образом показатель преломления пленки, так как интенсивность отраженного света определяется отношением коэффициентов преломления двух граничащих сред.

На линзу при обычных условиях падает белый свет. Выражение (8.16) показывает, что требуемая толщина пленки зависит от длины волны. Поэтому осуществить гашение отраженных волн всех частот невозможно. Толщину пленки подбирают так, чтобы добиться полного гашения при нормальном падении для длин волн средней части спектра (зеленый цвет, $\lambda_з \approx 5{,}5 \cdot 10^{-5}$ см). Она должна быть равна четверти длины волны в пленке:

$$h = \frac{\lambda_з}{4n_п}.$$

Отражение света для крайних участков спектра — красного и фиолетового — будет несколько меньшим. Поэтому объектив с просветленной оптикой в отраженном свете имеет сиреневый оттенок.

Сейчас даже простые дешевые фотоаппараты снабжены просветленной оптикой.

Гашение света светом не означает превращение световой энергии в другие формы. Как и при интерференции механических волн, гашение волн друг другом в данной области пространства означает, что световая энергия сюда просто не поступает. Гашение отраженных волн у объективов с просветленной оптикой приводит к тому, что весь свет проходит сквозь объектив.

---

§ 70 ДИФРАКЦИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЛН

Нередко волна встречает на своем пути небольшие (по сравнению с длиной волны) препятствия, которые она способна огибать. Когда размеры препятствий малы, волны, огибая края препятствий, смыкаются за ними. Так, морские волны свободно огибают выступающий из воды камень, если его размеры меньше длины волны или сравнимы с ней. За камнем волны распространяются так, как если бы его не было совсем. Точно так же волна от брошенного в пруд камня огибает торчащий из воды прутик. Только за препятствием большого по сравнению с длиной волны размера (большой камень на рисунке 8.52) образуется «тень»: волны за него не проникают.

Способностью огибать препятствия обладают и звуковые волны. Вы можете слышать сигнал машины за углом дома, когда самой машины не видно. В лесу деревья заслоняют ваших товарищей. Чтобы их не потерять или не потеряться самому, вы начинаете кричать. Звуковые волны в отличие от света свободно огибают стволы деревьев и доносят ваш голос до товарищей. Отклонение от прямолинейного распространения волн, или огибание волнами препятствий — называется **дифракцией**[1]. Дифракция присуща любому волновому процессу, так же как и интерференция. При дифракции происходит искривление волновых поверхностей у краев препятствий.

Дифракция волн проявляется особенно отчетливо в случаях, когда размеры препятствий меньше длины волны или сравнимы с ней.

Явление дифракции волн на поверхности воды можно наблюдать, если, например, поставить на пути волн экран с узкой щелью, размеры которой меньше длины волны (рис. 8.53). В этом опыте хорошо бывает видно, что за экраном распространяется круговая волна, как если бы в отверстии экрана находилось колеблющееся тело — источник волн. Согласно принципу Гюйгенса так и должно быть. Вторичные источники в узкой щели располагаются столь близко друг к другу, что их можно рассматривать как один точечный источник.

Если же размеры щели велики по сравнению с длиной

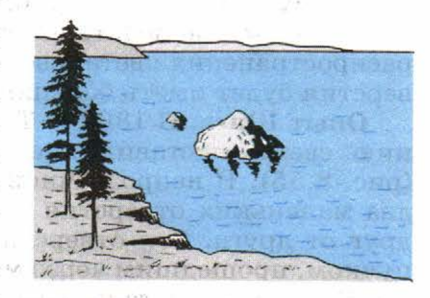


Рис. 8.52

[1] От латинского слова difractus — разломанный.


Рис. 8.53


Рис. 8.54

волны, то картина распространения волн за экраном совершенно иная (рис. 8.54). Волна проходит сквозь щель, почти не меняя своей формы. По краям можно заметить искривления волновой поверхности, в результате чего волна частично проникает и в пространство за экраном.

Принцип Гюйгенса позволяет понять, почему происходит дифракция. Вторичные волны, испускаемые участками среды, проникают за края препятствия, расположенного на пути распространения волны.



1. **Приведите примеры дифракции волн, не упомянутые в тексте.**
2. **При каких условиях дифракция волн проявляется особенно отчетливо?**

§ 71 ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Если свет представляет собой волновой процесс, то наряду с интерференцией должна наблюдаться и дифракция света. Ведь дифракция — огибание волнами краев препятствий — присуща любому волновому движению. Но наблюдать дифракцию света нелегко, так как волны отклоняются от прямолинейного распространения на заметные углы только на препятствиях, размеры которых сравнимы с длиной волны, а длина световой волны, как мы с вами знаем, очень мала.

Пропуская тонкий пучок света через маленькое отверстие, можно наблюдать нарушение закона прямолинейного распространения света: светлое пятно на экране против отверстия будет иметь бо́льшие размеры, чем размеры пучка.

Опыт Юнга. В 1802 г. Т. Юнг, открывший интерференцию света, поставил классический опыт по дифракции (рис. 8.55). В непрозрачной ширме он проколол булавкой два маленьких отверстия B и C на небольшом расстоянии друг от друга. Эти отверстия освещались узким световым пучком, прошедшим через малое отверстие A в другой ширме. Именно эта деталь, до которой очень трудно было додуматься в то время, решила успех опыта. Интерферируют ведь только когерентные волны. Возникшая в соответствии

с принципом Гюйгенса сферическая волна от отверстия A возбуждала в отверстиях B и C когерентные колебания. Вследствие дифракции от отверстий B и C выходили два световых конуса, которые частично перекрывались. В результате интерференции этих двух световых волн на экране появлялись чередующиеся светлые и темные полосы. Закрывая одно из отверстий, Юнг обнаружил, что интерференционные полосы исчезали. Именно с помощью этого опыта впервые Юнгом были измерены длины волн, соответствующие световым лучам разного цвета, причем весьма точно.

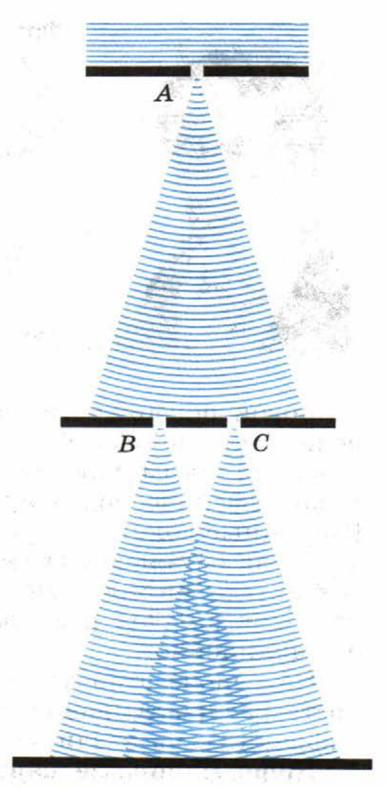


Рис. 8.55

Теория Френеля. Исследование дифракции было завершено в работах О. Френеля. Френель не только более детально исследовал различные случаи дифракции на опыте, но и разработал количественную теорию дифракции, позволяющую в принципе рассчитать дифракционную картину, возникающую при огибании светом любых препятствий. Им же было впервые объяснено прямолинейное распространение света в однородной среде на основе волновой теории.

Этих успехов Френель добился, объединив принцип Гюйгенса с идеей интерференции вторичных волн. Согласно идее Френеля ***каждая точка волнового фронта является источником вторичных волн, причем все вторичные источники когерентны*** *(принцип Гюйгенса — Френеля)*.

Для того чтобы вычислить амплитуду световой волны в любой точке пространства, надо мысленно окружить источник света замкнутой поверхностью. Интерференция волн от вторичных источников, расположенных на этой поверхности, определяет амплитуду в рассматриваемой точке пространства.

Такие расчеты позволили понять, каким образом свет от точечного источника S, испускающего сферические волны, достигает произвольной точки B пространства (рис. 8.56). Если рассмотреть вторичные источники на сферической



Френель Огюстен (1788—1827) — французский физик. Заложил основы волновой оптики. Дополнив принцип Гюйгенса идеей интерференции вторичных волн, разработал количественную теорию дифракции. На основе этого принципа объяснил законы геометрической оптики, в частности прямолинейный характер распространения света в однородной среде. Создал приближенный метод расчета дифракционной картины, основанный на разделении волновой поверхности на зоны. Впервые доказал поперечность световых волн.

волновой поверхности радиусом R, то результат интерференции вторичных волн от этих источников в точке B оказывается таким, как если бы лишь вторичные источники на малом сферическом сегменте ab посылали свет в точку B. Вторичные волны, испущенные источниками, расположенными на остальной части поверхности, гасят друг друга в результате интерференции. Поэтому все происходит так, как если бы свет распространялся вдоль прямой SB, т. е. прямолинейно.

На основе этой теории Френель доказал прямолинейность распространения света и рассмотрел количественно дифракцию на различного рода препятствиях.

Дифракционные картины от различных препятствий. Расчеты, сделанные Френелем, полностью были подтверждены экспериментом. Из-за того что длина световой волны очень мала, угол отклонения света от направления прямолинейного распространения невелик. Поэтому для отчетливого наблюдения дифракции нужно либо использовать очень маленькие препятствия, либо не располагать экран далеко от препятствий. При расстоянии между препятствием и экраном порядка метра размеры препятствия не должны превышать сотых долей миллиметра. Если же расстояние до экрана достигает сотен метров или нескольких километров, то дифракцию можно наблюдать на препятствиях размерами в несколько сантиметров и даже метров.

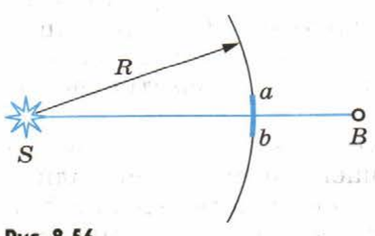
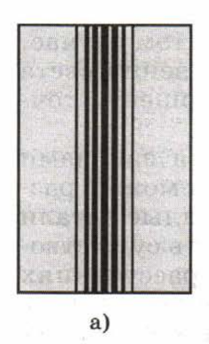
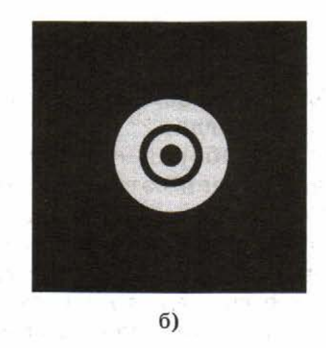


Рис. 8.56

На рисунке 8.57, *а—в* схематично показаны дифракционные картины от различных препятствий: *а* — от тонкой проволочки; *б* — от круглого отверстия; *в* — от круглого экрана.

Вместо тени от проволочки видны светлые и темные полосы; в центре дифракционной


а)


б)

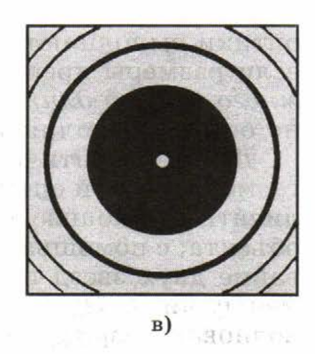

в)

Рис. 8.57

картины от отверстия появляется темное пятно, окруженное светлыми и темными кольцами[1]; в центре тени, образованной круглым экраном, видно светлое пятнышко, а сама тень окружена темными концентрическими кольцами.

Любопытный случай произошел на заседании Французской академии наук в 1818 г. Один из ученых, присутствовавших на заседании, обратил внимание на то, что из теории Френеля вытекают факты, явно противоречащие здравому смыслу. Так, при определенных размерах отверстия и определенных расстояниях от отверстия до источника света и экрана в центре светлого пятна должно находиться темное пятнышко. А за маленьким непрозрачным диском, наоборот, должно находиться светлое пятно в центре тени. Каково же было удивление ученых, когда поставленные эксперименты доказали, что так и есть на самом деле!

Границы применимости геометрической оптики. Все физические теории отражают происходящие в природе процессы лишь приближенно. Для любой теории могут быть указаны определенные границы ее применимости. Можно ли применять в конкретном случае данную теорию или нет, зависит не только от той точности, которую обеспечивает эта теория, но и от того, какая точность требуется при решении той или иной практической задачи. Границы применимости теории можно установить лишь после того, как разработана более общая теория, охватывающая те же явления.

Все эти общие положения относятся и к геометрической оптике. Эта теория является приближенной. Она неспособна объяснить, например, явления интерференции и дифракции света. Более общей и более точной теорией является волновая оптика. Согласно ей, закон прямолинейного распространения света и другие законы геометрической

[1] Изменяя диаметр отверстия, можно в центре дифракционной картины получить и светлое пятно, окруженное темными и светлыми кольцами.

оптики выполняются достаточно точно лишь в том случае, если размеры препятствий на пути распространения света *много больше длины световой волны*. Но совершенно точно они не выполняются никогда.

Действие оптических приборов описывается законами геометрической оптики. Согласно этим законам можно различать с помощью микроскопа сколь угодно малые детали объекта; с помощью телескопа можно установить существование двух звезд при любых малых угловых расстояниях между ними. Однако в действительности это не так, и лишь волновая теория света позволяет разобраться в причинах предела разрешающей способности оптических приборов.

Разрешающая способность микроскопа и телескопа. Волновая природа света налагает предел на возможность различать детали предмета или очень мелкие предметы при их наблюдении с помощью микроскопа. Дифракция не позволяет получить отчетливые изображения мелких предметов, так как свет распространяется не строго прямолинейно, а огибает предметы. Из-за этого изображения получаются размытыми. Это происходит, когда линейные размеры предметов меньше длины световой волны.

Дифракция также налагает предел на разрешающую способность телескопа. Вследствие дифракции волн у края оправы объектива изображением звезды будет не точка, а система светлых и темных колец. Если две звезды находятся на малом угловом расстоянии друг от друга, то эти кольца налагаются друг на друга, и глаз не может различить, имеются ли две светящиеся точки или одна. Предельное угловое расстояние между светящимися точками, при котором их можно различать, определяется отношением длины волны к диаметру объектива.

Этот пример показывает, что с дифракцией приходится считаться всегда, при любых препятствиях. Ею при очень тщательных наблюдениях нельзя пренебрегать и в случае препятствий, размеры которых значительно больше, чем длина волны.

Дифракция света определяет границы применимости геометрической оптики. Огибание светом препятствий налагает предел на разрешающую способность важнейших оптических инструментов — телескопа и микроскопа.



1. Какое явление называется дифракцией?
2. Почему дифракцию механических волн наблюдать легче, чем дифракцию света?
3. Почему с помощью микроскопа нельзя увидеть атом?
4. В каких случаях приближенно справедливы законы геометрической оптики?

§ 72 ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЕТКА

На явлении дифракции основано устройство оптического прибора — дифракционной решетки.

Дифракционная решетка представляет собой совокупность большого числа очень узких щелей, разделенных непрозрачными промежутками (рис. 8.58). Хорошую решетку изготовляют с помощью специальной делительной машины, наносящей на стеклянную пластину параллельные штрихи. Число штрихов доходит до нескольких тысяч на 1 мм; общее число штрихов превышает 100 000. Просты в изготовлении желатиновые отпечатки с такой решетки, зажатые между двумя стеклянными пластинами. Наилучшими качествами обладают так называемые отражательные решетки. Они представляют собой чередующиеся участки, отражающие свет и рассеивающие его. Рассеивающие свет штрихи наносятся резцом на отшлифованную металлическую пластину.

Если ширина прозрачных щелей (или отражающих свет полос) равна a, и ширина непрозрачных промежутков (или рассеивающих свет полос) равна b, то величина $d = a + b$ называется **периодом решетки**. Обычно период дифракционной решетки порядка 10 мкм.

Рассмотрим элементарную теорию дифракционной решетки. Пусть на решетку (рис. 8.59) падает плоская монохроматическая волна длиной волны λ. Вторичные источники, расположенные в щелях, создают световые волны, распространяющиеся по всем направлениям. Найдем условие, при котором идущие от щелей волны усиливают друг друга. Рассмотрим, например, волны, распространяющиеся в направлении, определяемом углом φ. Разность хода между волнами от краев соседних щелей равна длине отрезка AC. Если на этом отрезке укладывается целое число длин волн,

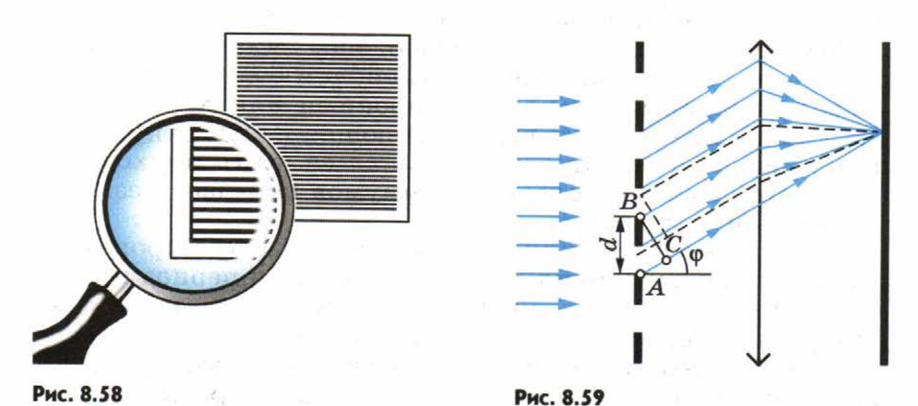


Рис. 8.58　　Рис. 8.59

то волны от всех щелей, складываясь, будут усиливать друг друга. Из треугольника ABC можно найти длину катета AC: $AC = AB \sin \varphi = d \sin \varphi$. Максимумы будут наблюдаться под углом φ, в соответствии с условием

$$\boxed{d \sin \varphi = \pm k\lambda,} \qquad (8.17)$$

где величина $k = 0, 1, 2, \ldots$ определяет порядок спектра.

Нужно иметь в виду, что при выполнении условия (см. формулу (8.17)) усиливают друг друга не только волны, идущие от нижних (см. рис. 8.59) краев щелей, но и волны, идущие от всех других точек щелей. Каждой точке в первой щели соответствует точка во второй щели, находящаяся на расстоянии d от первой точки. Поэтому разность хода испущенных этими точками вторичных волн равна $k\lambda$, и эти волны взаимно усиливаются.

За решеткой помещают собирающую линзу и за ней — экран на фокусном расстоянии от линзы. Линза фокусирует лучи, идущие параллельно, в одной точке. В этой точке происходит сложение волн и их взаимное усиление. Углы φ, удовлетворяющие условию (8.17), определяют положение так называемых **главных максимумов** на экране. Наряду с картиной, получаемой в результате дифракции света, в случае дифракционной решетки наблюдается дифракционная картина и от отдельных щелей. Интенсивности максимумов в ней меньше интенсивности главных максимумов.

Так как положение максимумов (кроме центрального, соответствующего $k = 0$) зависит от длины волны, то решетка разлагает белый свет в спектр (см. рис. IV, *1* на цветной вклейке; спектры второго и третьего порядков перекрываются). Чем больше λ, тем дальше от центрального максимума располагается тот или иной максимум, соответствующий данной длине волны (см. рис. IV, *2*, *3* на цветной вклейке). Каждому значению k соответствует свой порядок спектра.

Между максимумами расположены минимумы освещенности. Чем больше число щелей, тем более резко очерчены максимумы и тем более широкими минимумами они разделены. Световая энергия, падающая на решетку, перераспределяется ею так, что бóльшая ее часть приходится на максимумы, а в область минимумов попадает незначительная часть энергии.

С помощью дифракционной решетки можно проводить очень точные измерения длины волны. Если период решетки известен, то определение длины волны сводится к измерению угла φ, соответствующего направлению на максимум.

Наши ресницы вместе с промежутками между ними представляют собой грубую дифракционную решетку. По-

этому, если посмотреть, прищурившись, на яркий источник света, то можно обнаружить радужные цвета. Белый свет разлагается в спектр при дифракции вокруг ресниц. Лазерный диск с бороздками, проходящими близко друг от друга, подобен отражательной дифракционной решетке. Если вы посмотрите на отраженный им свет от электрической лампочки, то обнаружите разложение света в спектр. Можно наблюдать несколько спектров, соответствующих разным значениям k. Картина будет очень четкой, если свет от лампочки падает на пластинку под большим углом.

Множество узких щелей на небольшом расстоянии друг от друга образует замечательный оптический прибор — дифракционную решетку. Решетка разлагает свет в спектр и позволяет очень точно измерять длины световых волн.



1. **Зависит ли положение максимумов освещенности, создаваемых дифракционной решеткой, от числа щелей?**
2. **Что вы увидите, посмотрев на электрическую лампочку сквозь птичье перо?**
3. **Чем отличаются спектры, получаемые с помощью призмы, от дифракционных спектров?**

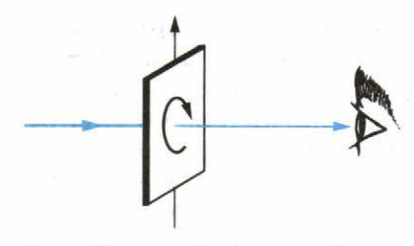
§ 73 ПОПЕРЕЧНОСТЬ СВЕТОВЫХ ВОЛН. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

Явления интерференции и дифракции не оставляют сомнений в том, что распространяющийся свет обладает свойствами волн. Но каких волн — продольных или поперечных?

Длительное время основатели волновой оптики Юнг и Френель считали световые волны продольными, т. е. подобными звуковым волнам. В то время световые волны рассматривались как упругие волны в эфире, заполняющем пространство и проникающем внутрь всех тел. Такие волны, казалось, не могли быть поперечными, так как поперечные волны, в соответствии с воззрениями того времени, могут существовать только в твердом теле. Но как могут тела двигаться в твердом эфире, не встречая сопротивления? Ведь эфир не должен препятствовать движению тел. В противном случае не выполнялся бы закон инерции.

Однако постепенно накапливалось все больше и больше экспериментальных фактов, которые никак не удавалось истолковать, считая световые волны продольными.

Опыты с турмалином. Рассмотрим подробно один из таких экспериментов, очень простой и эффектный. Это опыт с


Рис. 8.60

кристаллами турмалина (прозрачными кристаллами зеленой окраски).

Кристалл турмалина принадлежит к числу так называемых одноосных кристаллов. Возьмем прямоугольную пластину турмалина, вырезанную таким образом, чтобы одна из ее граней была параллельна оси кристалла. Если направить нормально на такую пластину пучок света от электрической лампы или солнца, то вращение пластины вокруг пучка никакого изменения интенсивности света, прошедшего через нее, не вызовет (рис. 8.60). Можно подумать, что свет только частично поглотился в турмалине и приобрел зеленоватую окраску. Больше ничего, кажется, и не произошло. Но это не так. Световая волна проявила новые свои свойства.

Эти новые свойства проявляются, если пучок света заставить пройти через второй точно такой же кристалл турмалина (рис. 8.61, *а*), параллельный первому. При одинаково направленных осях кристаллов опять ничего интересного не происходит: просто световой пучок еще более ослабляется за счет поглощения во втором кристалле. Но если второй кристалл вращать, оставляя первый неподвижным (рис. 8.61, *б*), то обнаружится удивительное явление — гашение света. По мере увеличения угла между осями интенсивность света уменьшается. И когда оси перпендикулярны друг другу, свет не проходит совсем (рис. 8.61, *в*). Он целиком поглощается вторым кристаллом. Как это можно объяснить?

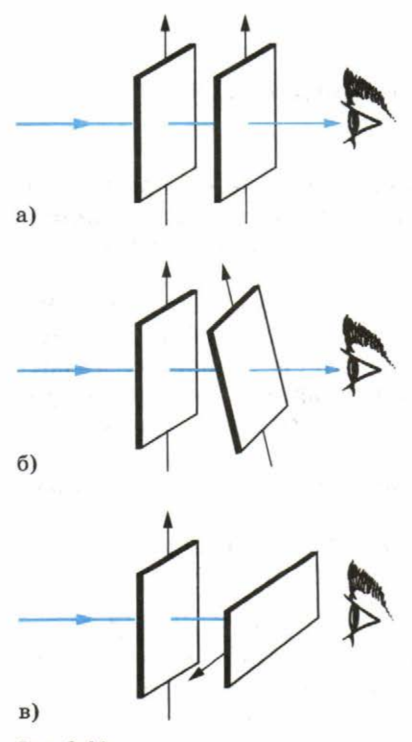


Рис. 8.61

Поперечность световых волн. Из описанных выше опытов следуют два вывода: *во-первых*, световая волна, идущая от источника света, полностью симметрична относительно направления распространения (при вращении кристалла вокруг лу-

ча в первом опыте интенсивность не менялась); *во-вторых*, волна, вышедшая из первого кристалла, не обладает осевой симметрией (в зависимости от поворота второго кристалла относительно луча интенсивность прошедшего света изменяется).

Продольные волны обладают полной симметрией по отношению к направлению распространения (колебания происходят вдоль этого направления, и оно является осью симметрии волны). Поэтому объяснить опыт с вращением второй пластины, считая световую волну продольной, невозможно.

Полное объяснение опыта можно получить, сделав два предположения.

Первое предположение относится к самому свету. *Свет — поперечная волна.* В падающем от обычного источника пучке световых волн происходят колебания всевозможных направлений, перпендикулярных направлению распространения волн (рис. 8.62).

Согласно этому предположению световая волна обладает осевой симметрией, являясь в то же время поперечной. Волны, например, на поверхности воды такой симметрией не обладают, так как колебания частиц воды происходят только в вертикальной плоскости.

Световой поток, в котором колебания происходят по всем направлениям, перпендикулярным направлению распространения волн, называется **естественным светом**. Такое название оправданно, так как в обычных условиях источники света излучают такой поток. Данное предположение объясняет результат первого опыта. Вращение кристалла турмалина не меняет интенсивность прошедшего света, потому что падающая волна обладает осевой симметрией (несмотря на то, что она поперечная).

Второе предположение относится не к световой волне, а к кристаллу. *Кристалл турмалина обладает способностью пропускать световые волны с колебаниями, проис-*

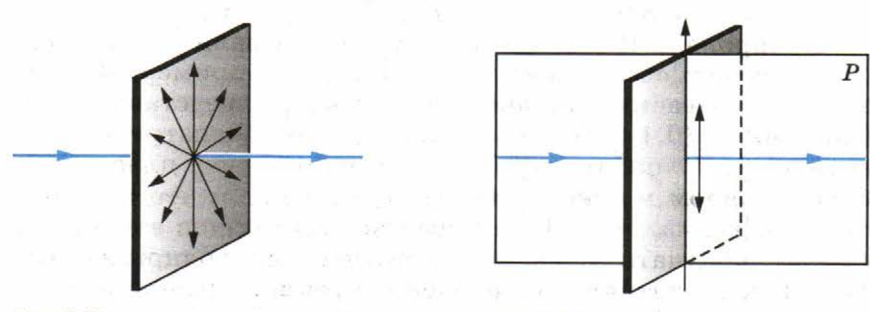
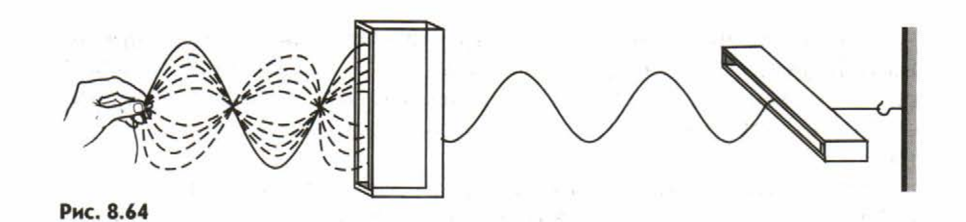


Рис. 8.62 **Рис. 8.63**


Рис. 8.64

ходящими *в одной определенной плоскости* (плоскость P на рисунке 8.63). Такой свет называется **поляризованным** или, точнее, **плоскополяризованным** в отличие от естественного света, который может быть назван также неполяризованным.

Это предположение полностью объясняет результаты второго опыта. Из первого кристалла выходит плоскополяризованная волна. При скрещенных кристаллах (угол между их осями 90°) она не проходит сквозь второй кристалл. Если оси кристаллов составляют между собой некоторый угол, отличный от 90°, то проходят колебания, амплитуда которых равна проекции амплитуды волны, прошедшей через первый кристалл, на направление оси второго кристалла.

Итак, кристалл турмалина преобразует естественный свет в плоскополяризованный.

Механическая модель опытов с турмалином. Нетрудно построить простую наглядную механическую модель рассматриваемого явления. Можно получить поперечную волну в резиновом шнуре так, чтобы колебания быстро меняли свое направление в пространстве. Это аналог естественной световой волны. Пропустим теперь шнур сквозь узкий деревянный ящик (рис. 8.64). Из колебаний всевозможных направлений ящик «выделяет» колебания в одной определенной плоскости. Поэтому из ящика выходит поляризованная волна. Если на ее пути имеется еще точно такой же ящик, но повернутый относительно первого на 90°, то колебания сквозь него не проходят. Волна целиком гасится.

Поляроиды. Не только кристаллы турмалина способны поляризовать свет. Таким же свойством, например, обладают так называемые поляроиды. Поляроид представляет собой тонкую (0,1 мм) пленку кристаллов герапатита, нанесенную на целлулоид или стеклянную пластинку. С поляроидом можно провести те же опыты, что и с кристаллом турмалина. Преимущество поляроидов в том, что можно получать большие поверхности, поляризующие свет. К недостаткам поляроидов относится фиолетовый оттенок, который они придают белому свету.

Прямыми опытами доказано, что световая волна является поперечной. В поляризованной световой волне колебания происходят в строго определенном — поперечном направлении.



Чем отличается естественный свет от поляризованного?

§ 74 ПОПЕРЕЧНОСТЬ СВЕТОВЫХ ВОЛН И ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ТЕОРИЯ СВЕТА

Электромагнитная теория света берет начало от работ Максвелла.

В основе электромагнитной теории света лежит факт совпадения скорости света со скоростью распространения электромагнитных волн.

Из теории Максвелла следовало, что электромагнитные волны являются поперечными. К тому времени поперечность световых волн уже была доказана экспериментально. Поэтому Максвелл обоснованно считал поперечность электромагнитных волн еще одним важным доказательством справедливости электромагнитной теории света.

После того как Герц экспериментально получил электромагнитные волны и измерил их скорость, электромагнитная теория света была впервые экспериментально подтверждена. Было доказано, что электромагнитные волны при распространении проявляют те же свойства, что и световые: отражение, преломление, интерференцию, поляризацию и др. (см. § 54). В конце XIX в. было окончательно установлено, что световые волны возбуждаются движущимися в атомах заряженными частицами.

С признанием электромагнитной теории света постепенно исчезли все затруднения, связанные с необходимостью введения гипотетической среды — эфира, который приходилось рассматривать как твердое тело. Световые волны — это не механические волны в особой всепроникающей среде — эфире, а электромагнитные волны. Электромагнитные процессы подчиняются не законам механики, а законам электромагнетизма. Эти законы и были установлены в окончательной форме Максвеллом.

В электромагнитной волне векторы $\vec{E}$ и $\vec{B}$ перпендикулярны друг другу. В естественном свете колебания напряженности $\vec{E}$ электрического поля и магнитной индукции $\vec{B}$ происходят по всем направлениям, перпендикулярным на-

правлению распространения волны. Если свет поляризован, то колебания векторов $\vec{E}$ и $\vec{B}$ происходят не по всем направлениям, а в двух определенных плоскостях. Электромагнитная волна, изображенная на рисунке 7.1, является поляризованной.

Возникает естественный вопрос: если речь идет о направлении колебаний в световой волне, то, собственно говоря, колебания какого вектора — $\vec{E}$ или $\vec{B}$ — имеются в виду? Специально поставленные опыты доказали, что на сетчатку глаза или фотоэмульсию действует электрическое поле световой волны. В связи с этим за направление колебаний в световой волне принято направление вектора напряженности $\vec{E}$ электрического поля.

Открытие электромагнитной теории света — одно из немногих открытий, сделанных на кончике пера, т. е. теоретически.

Всеобщее признание электромагнитная теория получила, однако, лишь после своего экспериментального подтверждения.



ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

1. В опыте Юнга по дифракции световых волн расстояние между щелями $d = 0{,}07$ мм, а расстояние от двойной щели до экрана $D = 2$ м. При освещении прибора зеленым светом расстояние между соседними светлыми дифракционными полосами оказалось равным $\Delta h = 16$ мм. Определите длину волны.

Решение. В некоторой точке C экрана (рис. 8.65) будет наблюдаться максимум освещенности, если выполнено условие

$$d_2 - d_1 = k\lambda,$$

где $k = 0, 1, 2, \ldots$ — целые числа.

Применим теорему Пифагора к треугольникам S_1CE и S_2CB:

$$d_2^2 = D^2 + \left(h_k + \frac{d}{2}\right)^2,$$

$$d_1^2 = D^2 + \left(h_k - \frac{d}{2}\right)^2.$$

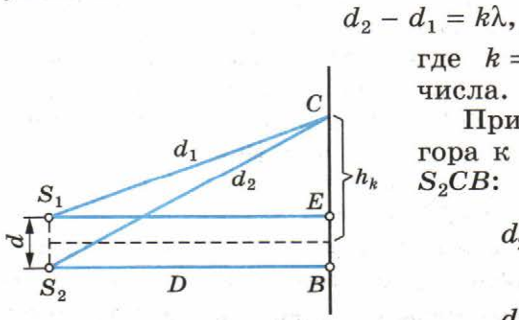


Рис. 8.65

Вычитая почленно из первого равенства второе, получаем

$$d_2^2 - d_1^2 = 2h_k d,$$

или

$$(d_1 + d_2)(d_2 - d_1) = 2h_k d.$$

Так как $d \ll D$, то $d_1 + d_2 \approx 2D$. Следовательно,

$$d_2 - d_1 \approx \frac{h_k d}{D}.$$

Учитывая, что $d_2 - d_1 = k\lambda$, можем записать:

$$k\lambda \approx \frac{h_k d}{D}.$$

Отсюда находим расстояние k-й светлой полосы от центра экрана:

$$h_к \approx \frac{k\lambda D}{d}.$$

Расстояние между соседними полосами равно:

$$\Delta h = h_{k+1} - h_k \approx \frac{\lambda D}{d}.$$

Отсюда

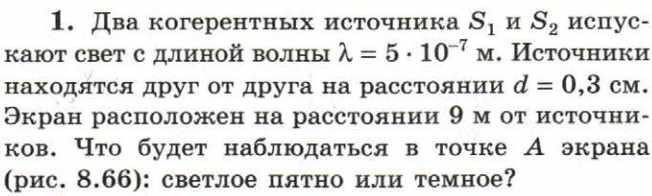
$$\lambda \approx \frac{d\Delta h}{D} \approx 5{,}6 \cdot 10^{-5}\ (\text{см}).$$

2. На дифракционную решетку, имеющую 500 штрихов на 1 мм, падает плоская монохроматическая волна ($\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$ см). Определите наибольший порядок спектра k, который можно наблюдать при нормальном падении лучей на решетку.

Решение. Максимальному k соответствует $\sin\varphi = 1$ [см. формулу (8.17)]. Следовательно, $k = \dfrac{d}{\lambda} = 4$.



УПРАЖНЕНИЕ 10



1. Два когерентных источника S_1 и S_2 испускают свет с длиной волны $\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$ м. Источники находятся друг от друга на расстоянии $d = 0{,}3$ см. Экран расположен на расстоянии 9 м от источников. Что будет наблюдаться в точке A экрана (рис. 8.66): светлое пятно или темное?

2. На дифракционную решетку, имеющую период $d = 1{,}2 \cdot 10^{-3}$ см, падает по нормали монохроматическая волна. Оцените длину волны λ, если угол между спектрами второго и третьего порядков $\Delta\varphi = 2°30'$.



Рис. 8.66

КРАТКИЕ ИТОГИ ГЛАВЫ 8

1. Скорость света в вакууме определена экспериментально. Она примерно равна 300 000 км/с. Во всех средах скорость света меньше, чем в вакууме.
2. Преломление света на границе двух сред обусловлено изменением скорости при переходе света из одной среды в другую. Относительный показатель преломления двух сред равен обратному отношению скоростей света в этих средах.
3. Широкое применение имеют линзы — прозрачные тела, ограниченные сферическими поверхностями.
   Основная формула линзы связывает ее фокусное расстояние F (расстояние от линзы до фокуса), расстояние d от предмета до линзы и расстояние f от линзы до изображения:
   $$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}.$$
   Величины F, f и d в этой формуле могут быть как положительными, так и отрицательными: положительные значения соответствуют действительным фокусу, изображению и предмету, а отрицательные — мнимым.
4. Показатель преломления света, как впервые установил Ньютон, зависит от его цвета. Цвет же определяется частотой колебаний (или длиной световой волны). Зависимость показателя преломления света от частоты колебаний называется дисперсией. Дисперсия приводит к тому, что призма разлагает белый свет в спектр. Скорость света и длина волны уменьшаются при переходе из вакуума в среду. Частота колебаний при этом остается неизменной.
5. Световые волны одинаковой длины волны, имеющие постоянную во времени разность фаз, называются когерентными. При наложении когерентных волн друг на друга наблюдается интерференция света. Волны усиливают или ослабляют друг друга в зависимости от разности хода между ними. Когерентные волны образуются, например, при отражении световых волн от двух поверхностей тонкой пленки. Так как разность фаз колебаний интерферирующих волн зависит не только от толщины пленки, но и от длины волны, то при освещении пленки белым светом образуется цветная интерференционная картина.
6. Световые волны огибают препятствия, сравнимые по размерам с длиной световой волны. Это дифракция света. Так как длина световой волны очень мала (порядка 10^{-5} см), то наблюдение дифракции света затруднено

и требует специальных приспособлений. Дифракция света налагает предел на разрешающую способность микроскопа и телескопа.

7. Законы геометрической оптики выполняются при условии, что размеры препятствий на пути световых волн много больше длины волны.

8. На явлении дифракции основано устройство дифракционной решетки: совокупности большого числа одинаковых щелей, разделенных узкими промежутками. Значения углов φ, определяющих направления на дифракционные максимумы спектра, получаемого с помощью решетки, находят из равенства $d \sin \varphi = k\lambda$, где $k = 0, 1, 2, \ldots$, а d — период решетки.
Решетка разлагает белый свет в спектр; с ее помощью можно измерять длины световых волн.

9. Световые волны поперечны. Это доказано экспериментально при наблюдении прохождения света через анизотропные среды — кристаллы. Световая волна, в которой колебания происходят в определенной плоскости, называется поляризованной. Свет, создаваемый обычными источниками (естественный свет), не поляризован. Колебания в световой волне происходят по всем направлениям в плоскости, перпендикулярной направлению ее распространения.

10. Согласно электромагнитной теории, свет представляет собой поперечную электромагнитную волну. Экспериментальное доказательство поперечности световых волн явилось важным этапом в признании справедливости электромагнитной теории света.

Глава 9. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

С развитием электродинамики изменились представления о пространстве и времени.

Согласно классическим представлениям о пространстве и времени, считавшимся на протяжении веков незыблемыми, движение не оказывает никакого влияния на течение времени (время абсолютно), а линейные размеры любого тела не зависят от того, покоится тело или движется (длина абсолютна).

Специальная теория относительности Эйнштейна — это новое учение о пространстве и времени, пришедшее на смену старым (классическим) представлениям.

§ 75 ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ И ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Принцип относительности в механике и электродинамике. После того как во второй половине XIX в. Максвеллом были сформулированы основные законы электродинамики, возник вопрос: распространяется ли принцип относительности, справедливый для механических явлений, и на электромагнитные явления? Иными словами, протекают ли электромагнитные процессы (взаимодействие зарядов и токов, распространение электромагнитных волн и т. д.) одинаково во всех инерциальных системах отсчета? Или, быть может, равномерное прямолинейное движение, не влияя на механические явления, оказывает некоторое воздействие на электромагнитные процессы?

Чтобы ответить на эти вопросы, нужно было выяснить, меняются ли основные законы электродинамики при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой, или же, подобно законам Ньютона, они остаются неизменными. Только в последнем случае можно отбросить сомнения в справедливости принципа относительности применительно к электромагнитным процессам и рассматривать этот принцип как общий закон природы.

Законы электродинамики сложны, и строгое решение этой задачи — нелегкое дело. Однако уже простые соображения, казалось бы, позволяют найти правильный ответ. Согласно законам электродинамики скорость распространения электромагнитных волн в вакууме одинакова по всем направлениям и равна $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Но в соответствии с законом сложения скоростей механики Ньютона скорость может быть равна скорости света только в одной избранной системе отсчета. В любой другой системе отсчета, движущейся по отношению к этой избранной системе отсчета со скоростью $\vec{v}$, скорость света должна уже быть равна $\vec{c} - \vec{v}$. Это означает, что если справедлив обычный закон сложения скоростей, то при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой законы электродинамики должны меняться так, чтобы в этой новой системе отсчета скорость света уже была равна не $\vec{c}$, а $\vec{c} - \vec{v}$.

Таким образом, обнаружились определенные противоречия между электродинамикой и механикой Ньютона, законы которой согласуются с принципом относительности. Возникшие трудности пытались преодолеть тремя различными способами.

Первый способ: объявить несостоятельным принцип относительности в применении к электромагнитным явлениям. Эту точку зрения разделял великий голландский физик, основатель электронной теории Х. Лоренц. Электромагнитные явления еще со времен Фарадея рассматривались как процессы, происходящие в особой, всепроникающей среде, заполняющей все пространство, — мировом эфире. Инерциальная система отсчета, покоящаяся относительно эфира, — это согласно Лоренцу особая, преимущественная система отсчета. В ней законы электродинамики Максвелла справедливы и наиболее просты по форме. Лишь в этой системе отсчета скорость света в вакууме одинакова по всем направлениям.

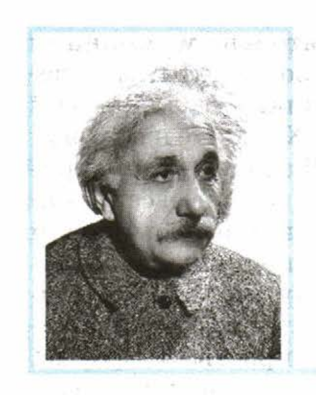
Второй способ: считать неправильными уравнения Максвелла и пытаться изменить их таким образом, чтобы они при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой (в соответствии с обычными, классическими представлениями о пространстве и времени) не менялись. Такая попытка, в частности, была предпринята Г. Герцем. По Герцу, эфир полностью увлекается движущимися телами и поэтому электромагнитные явления протекают одинаково независимо от того, покоится тело или движется. Принцип относительности остается справедливым.

Наконец, *третий способ*: отказаться от классических представлений о пространстве и времени, с тем чтобы сохранить как принцип относительности, так и законы Максвелла. Это наиболее революционный путь, ибо он означает пересмотр в физике самых глубоких, основных представлений. С данной точки зрения оказываются неточными не уравнения электромагнитного поля, а законы механики Ньютона, согласующиеся со старыми представлениями о пространстве и времени. Изменять нужно законы механики, а не законы электродинамики Максвелла.

Единственно правильным оказался именно третий способ. Последовательно развивая его, А. Эйнштейн пришел к новым представлениям о пространстве и времени. Первые два пути, как оказалось, опровергаются экспериментом.

Точка зрения Лоренца, согласно которой должна существовать избранная система отсчета, связанная с мировым эфиром, пребывающим в абсолютном покое, была опровергнута прямыми опытами.

Если бы скорость света была равна 300 000 км/с только в системе отсчета, связанной с эфиром, то, измеряя скорость света в произвольной инерциальной системе отсчета,



Эйнштейн Альберт (1879—1955) — великий физик XX в. Создал новое учение о пространстве и времени — специальную теорию относительности. Обобщая эту теорию для неинерциальных систем отсчета, разработал общую теорию относительности, представляющую собой современную теорию тяготения. Впервые ввел представление о частицах света — фотонах. Его работа по теории броуновского движения привела к окончательной победе молекулярно-кинетической теории строения вещества.

можно было бы обнаружить движение этой системы отсчета по отношению к эфиру и определить скорость этого движения. Подобно тому как в системе отсчета, движущейся относительно воздуха, возникает ветер, при движении по отношению к эфиру (если, конечно, эфир существует) должен быть обнаружен «эфирный ветер». Опыт по обнаружению «эфирного ветра» был поставлен в 1881 г. американскими учеными А. Майкельсоном и Э. Морли по идее, высказанной за 12 лет до этого Максвеллом.

В этом опыте сравнивалась скорость света в направлении движения Земли и в перпендикулярном направлении. Измерения проводились очень точно с помощью специального прибора — интерферометра Майкельсона. Эксперименты ставились в разное время суток и различные времена года. Но всегда получался отрицательный результат: движения Земли по отношению к эфиру обнаружить не удалось.

Таким образом, идея о существовании преимущественной системы отсчета не выдержала опытной проверки. В свою очередь, это означало, что никакой особой среды — «светоносного эфира», с которой можно было бы связать такую преимущественную систему отсчета, не существует.

При попытках Герца изменить законы электродинамики Максвелла выяснилось, что новые уравнения неспособны объяснить ряд наблюдаемых фактов. Так, согласно теории Герца движущаяся вода должна полностью увлекать за собой распространяющийся в ней свет, так как она увлекает эфир, в котором свет распространяется. Опыт же показал, что в действительности это не так.

Согласовать принцип относительности с электродинамикой Максвелла оказалось возможным, только отказавшись от классических представлений о пространстве и времени, согласно которым расстояния и течение времени не зависят от системы отсчета.

§ 76 ПОСТУЛАТЫ[1] ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

В основе теории относительности лежат два постулата.

1. Все процессы в природе протекают одинаково во всех инерциальных системах отсчета.

Это означает, что во всех инерциальных системах отсчета физические законы имеют одинаковую форму. Таким образом, принцип относительности классической механики распространяется на все процессы в природе, в том числе и на электромагнитные.

2. Скорость света в вакууме одинакова во всех инерциальных системах отсчета и не зависит ни от скорости источника, ни от скорости приемника светового сигнала.

Скорость света занимает, таким образом, особое положение. Более того, как вытекает из постулатов теории относительности, скорость света в вакууме является максимально возможной скоростью передачи взаимодействий в природе.

Для того чтобы сформулировать постулаты теории относительности, нужна была большая научная смелость, так как они противоречили классическим представлениям о пространстве и времени.

В самом деле, допустим, что в момент времени, когда начала координат инерциальных систем отсчета K и K_1, движущихся относительно друг друга со скоростью $\vec{v}$, совпадают, в начале координат происходит кратковременная вспышка света. За время t системы отсчета сместятся относительно друг друга на расстояние vt, а сферическая волновая поверхность будет иметь радиус vt (рис. 9.1). Системы отсчета K и K_1 равноправны, и скорость света одинакова в той и другой системе отсчета. Следовательно, с точки зрения наблюдателя, связанного с системой отсчета K, центр сферы будет находиться в точке O, а с точки зрения наблюдателя, связанного с системой отсчета K_1, — в точке O_1. Но ведь не может одна и та же сферическая поверхность иметь

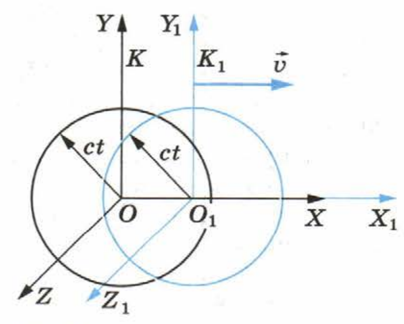


Рис. 9.1

---

[1] Постулат в физической теории выполняет ту же роль, что и аксиома в математике. Это — основное положение, которое не может быть логически доказано. В физике постулат есть результат обобщения опытных фактов.

центры в точках O и O_1. Это явное противоречие вытекает из рассуждений, основанных на постулатах теории относительности.

Как мы видим, имеется противоречие с классическими представлениями о пространстве и времени, которые при больших скоростях движения несправедливы. Однако сама теория относительности не содержит противоречий и является абсолютно логичной.



1. Какие утверждения лежат в основе теории относительности?
2. В чем отличие первого постулата теории относительности от принципа относительности в механике?

§ 77 ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ ОДНОВРЕМЕННОСТИ

До начала XX в. никто не сомневался, что время абсолютно. Два события, одновременные для жителей Земли, одновременны для жителей любой космической цивилизации. Создание теории относительности привело к выводу о том, что это не так.

Причиной несостоятельности классических представлений о пространстве и времени является неправильное предположение о возможности мгновенной передачи взаимодействий и сигналов из одной точки пространства в другую. Существование предельной конечной скорости передачи взаимодействий вызывает необходимость глубокого изменения привычных представлений о пространстве и времени, основанных на повседневном опыте. Представление об абсолютном времени, которое течет раз и навсегда заданным темпом совершенно независимо от материи и ее движения, оказывается неправильным.

Если допустить возможность мгновенного распространения сигналов, то утверждение, что события в двух пространственно разделенных точках A и B произошли одновременно, будет иметь абсолютный смысл. Можно поместить в точки A и B часы и синхронизировать их с помощью мгновенных сигналов. Если такой сигнал отправлен из точки A, например, в 0 ч 45 мин и он в этот же момент времени по часам B пришел в точку B, то, значит, часы показывают одинаковое время, т. е. идут синхронно. Если же такого совпадения нет, то часы можно синхронизировать, подведя вперед те часы, которые показывают меньшее время в момент отправления сигнала.

Любые события, например два удара молнии, одновременны, если они происходят при одинаковых показаниях синхронизированных часов.

Только располагая в точках A и B синхронизированные часы, можно судить о том, произошли ли два каких-либо события в этих точках одновременно или нет. Но как можно синхронизировать часы, находящиеся на некотором расстоянии друг от друга, если скорость распространения сигналов не бесконечно велика?

Для синхронизации часов естественно использовать световые или вообще электромагнитные сигналы, так как скорость электромагнитных волн в вакууме является строго определенной, постоянной величиной.

Именно этот способ используют для проверки часов по радио. Сигналы времени позволяют синхронизировать ваши часы с точными эталонными часами. Зная расстояние от радиостанции до дома, можно вычислить поправку на запаздывание сигнала. Эта поправка, конечно, очень мала. В повседневной жизни она не играет сколько-нибудь заметной роли. Но при огромных космических расстояниях она может оказаться весьма существенной.

Рассмотрим подробнее простой метод синхронизации часов, не требующий никаких вычислений. Допустим, что космонавт хочет узнать, одинаково ли идут часы A и B, установленные на противоположных концах космического корабля. Для этого с помощью источника, неподвижного относительно корабля и расположенного в его середине, космонавт производит вспышку света. Свет одновременно достигает тех и других часов. Если показания часов в этот момент одинаковы, то часы идут синхронно.

Но так будет лишь в системе отсчета K_1, связанной с кораблем. В системе же отсчета K, относительно которой корабль движется, положение иное. Часы на носу корабля удаляются от того места, где произошла вспышка света источника (точка с координатой OC), и, чтобы достигнуть часов A, свет должен преодолеть расстояние, большее половины длины корабля (рис. 9.2). Напротив, часы B на корме приближаются к месту вспышки, и путь светового сигнала меньше половины длины корабля. (На рисунке 9.2, *а* коор-

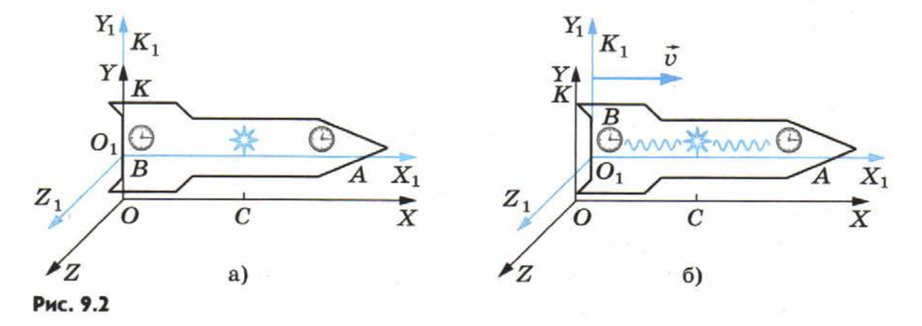


Рис. 9.2

динаты x и x_1 совпадают в момент вспышки; на рисунке 9.2, *б* показано положение систем отсчета в момент, когда свет достигает часов B.) Поэтому наблюдатель, находящийся в системе K, сделает вывод: сигналы достигают тех и других часов не одновременно.

Два любых события в точках A и B, одновременные в системе отсчета K_1, неодновременны в системе K. Но согласно принципу относительности системы K_1 и K совершенно равноправны. Ни одной из этих систем отсчета нельзя отдать предпочтение. Поэтому мы вынуждены прийти к заключению, что *одновременность пространственно разделенных событий относительна*. Причиной относительности одновременности является, как мы видим, конечность скорости распространения сигналов.

Именно в относительности одновременности кроется решение парадокса со сферическими световыми сигналами, о котором шла речь в § 76. Свет одновременно достигает точек сферической поверхности с центром в точке O только с точки зрения наблюдателя, находящегося в покое относительно системы K. С точки же зрения наблюдателя, связанного с системой K_1, свет достигает этих точек в разные моменты времени.

Разумеется, справедливо и обратное: с точки зрения наблюдателя в системе отсчета K свет достигает точек поверхности сферы с центром в точке O_1 в различные моменты времени, а не одновременно, как это представляется наблюдателю в системе отсчета K_1.

Отсюда следует вывод, что никакого парадокса в действительности нет.

Одновременность событий относительна. Представить себе это наглядно, «почувствовать», мы не в состоянии из-за того, что скорость света много больше тех скоростей, с которыми привыкли двигаться мы.



Какие события называются одновременными?

§ 78 ОСНОВНЫЕ СЛЕДСТВИЯ ИЗ ПОСТУЛАТОВ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Из постулатов теории относительности вытекает ряд важнейших следствий. Перечислим их, не останавливаясь на обосновании этих следствий.

Относительность расстояний. Расстояние между двумя точками тела не является абсолютной величиной, а зави-

сит от скорости движения тела относительно данной системы отсчета.

Обозначим через l_0 длину стержня в системе отсчета K_1, относительно которой стержень покоится. Тогда длина l этого стержня в системе отсчета K, относительно которой стержень движется со скоростью $\vec{v}$, определяется формулой

$$l = l_0\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (9.1)$$

Как видно из этой формулы, $l < l_0$. В этом состоит так называемое **релятивистское сокращение размеров** движущегося тела.

Относительность промежутков времени. Пусть интервал времени между двумя событиями, происходящими в одной и той же точке инерциальной системы отсчета K, равен τ_0. Этими событиями, например, могут быть два удара метронома в K-системе, отсчитывающего секунды.

Тогда интервал τ между теми же событиями в системе отсчета K_1, движущейся относительно системы K со скоростью $\vec{v}$, равен:

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (9.2)$$

Очевидно, что $\tau > \tau_0$. В этом состоит **релятивистский эффект замедления времени** в движущихся системах отсчета: движущиеся часы «тикают» медленнее, чем покоящиеся.

Если $v \ll c$, то в формулах (9.1) и (9.2) можно пренебречь величиной $\frac{v^2}{c^2}$. Тогда $l \approx l_0$ и $\tau \approx \tau_0$, т. е. релятивистское сокращение размеров тела и замедление времени в движущихся системах отсчета можно не учитывать.

Релятивистский закон сложения скоростей. Новым релятивистским представлениям о пространстве и времени соответствует новый закон сложения скоростей. Очевидно, что классический закон сложения скоростей не может быть справедливым, так как он противоречит утверждению о постоянстве скорости света в вакууме.

Если поезд движется со скоростью $\vec{v}$ и в вагоне в направлении движения поезда распространяется световая волна, то ее скорость относительно земли должна быть равна опять-таки $\vec{c}$, а не $\vec{v} + \vec{c}$. Новый закон сложения скоростей и должен приводить к требуемому результату.

Мы запишем этот закон сложения скоростей для частного случая, когда тело движется вдоль оси X_1 системы отсчета K_1, которая, в свою очередь, движется со скоростью $\vec{v}$

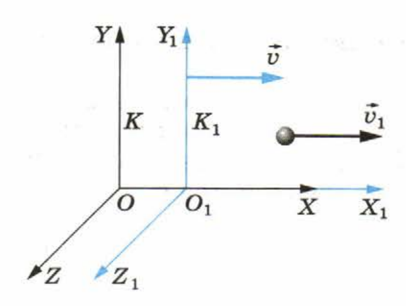


Рис. 9.3

относительно системы отсчета K. Причем в процессе движения координатные оси OX и OX_1 все время совпадают, а координатные оси OY и OY_1, OZ и OZ_1 остаются параллельными (рис. 9.3).

Обозначим скорость тела относительно системы отсчета K_1 через v_1, а скорость этого же тела относительно системы K через v_2. Тогда **релятивистский закон сложения скоростей** будет иметь вид:

$$v_2 = \frac{v_1 + v}{1 + \frac{v_1 v}{c^2}}. \qquad (9.3)$$

Если $v \ll c$ и $v_1 \ll c$, то членом $\frac{v_1 v}{c^2}$ в знаменателе можно пренебречь, и вместо выражения (9.3) получим привычный нам классический закон сложения скоростей:

$$v_2 = v_1 + v.$$

При $v_1 = c$ скорость v_2 также равна c — в соответствии со вторым постулатом теории относительности. Действительно,

$$v_2 = \frac{c + v}{1 + \frac{cv}{c^2}} = c\frac{c + v}{c + v} = c.$$

Замечательным свойством релятивистского закона сложения скоростей является то, что при любых скоростях v_1 и v (конечно, не бóльших c) результирующая скорость v_2 не превышает c.

Из постулатов теории относительности следует, что длина тела, промежуток времени между двумя событиями зависят от выбранной системы отсчета, т. е. являются относительными.

Релятивистский закон сложения скоростей переходит в классический при $v \ll c$.



1. **При каких скоростях движения релятивистский закон сложения скоростей переходит в классический (закон Галилея)?**
2. **В чем принципиальное отличие скорости света от скоростей движения тел?**

§ 79 ЭЛЕМЕНТЫ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ДИНАМИКИ

С новыми пространственно-временными представлениями не согласуются при больших скоростях движения и законы механики Ньютона. Лишь при малых скоростях движения, когда справедливы классические представления о пространстве и времени, второй закон Ньютона (уравнение движения)

$$m\frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} = \vec{F} \qquad (9.4)$$

не меняет своей формы при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой (выполняется принцип относительности).

Но при больших скоростях движения этот закон в своей обычной (классической) форме несправедлив. Однако введенные в динамике основные понятия: энергия, импульс — имеют тот же физический смысл, лишь понятие массы в классической механике отличается от понятия массы в релятивистской динамике.

В природе существуют частицы, скорость которых равна скорости света. Это фотоны и различного типа нейтрино. Масса этих частиц равна нулю. Они не могут быть замедлены или ускорены. Поэтому во всех инерциальных системах отсчета их импульс и энергия не равны нулю. Такие частицы называются **безмассовыми**.

Энергия и импульс таких частиц связаны соотношениями

$$E = pc \text{ и } E^2 - p^2c^2 = 0. \qquad (9.5)$$

Эти соотношения экспериментально подтверждены.

Однако для большинства частиц масса является одной из важнейших характеристик. Эти частицы называются **массовыми**. Скорость таких частиц $v < c$.

Массовая частица обладает собственной энергией:

$$E = mc^2. \qquad (9.6)$$

Согласно этой формуле тело обладает энергией и при скорости, равной нулю — **энергией покоя**.

Это замечательный результат. *Любое тело уже только благодаря факту своего существования обладает энергией, которая пропорциональна его массе m.*

При превращениях элементарных частиц, обладающих массой покоя $m \neq 0$, в частицы, у которых $m = 0$, их энергия покоя E_0 целиком превращается в кинетическую энергию вновь образовавшихся частиц. Этот факт является наиболее очевидным экспериментальным доказательством существования энергии покоя.

Во всех инерциальных системах отсчета импульс частицы и ее энергия связаны соотношением:

$$E^2 - p^2c^2 = m^2c^4. \tag{9.7}$$

Так как величины m и c не меняются при переходе от одной системы отсчета к другой, то, следовательно, не меняется и значение $E^2 - p^2c^2$.

Выражение (9.7) преобразуется в уравнение (9.5) при $m = 0$, следовательно, оно справедливо также и для безмассовых частиц. Формула (9.7) является фундаментальным соотношением релятивистской механики.

Энергия частицы выражается через ее импульс следующим образом:

$$E = \sqrt{p^2c^2 + m^2c^4}. \tag{9.8}$$

Используя формулу (9.8), а также учитывая, что импульс частицы пропорционален ее скорости и энергии, получаем выражения для импульса и энергии частицы:

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \tag{9.9}$$

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \tag{9.10}$$

При $v \ll c$ мы получим выражение для импульса в классической механике: $\vec{p} = m\vec{v}$.

Множитель $\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ *(релятивистский множитель)* при малых скоростях можно преобразовать:

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \approx 1 + \frac{v^2}{2c^2}.$$

Подставив это выражение в формулу (9.10) и получим

$$E \approx mc^2 + \frac{mv^2}{2}. \tag{9.11}$$

Последнее слагаемое — это выражение для кинетической энергии в классической механике.

Первое слагаемое в формуле (9.11) — это собственная энергия частицы.

Релятивистская энергия есть сумма собственной энергии частицы и релятивистской кинетической энергии $E_к$:

$$E = mc^2 + E_к. \qquad (9.12)$$

Из уравнений (9.10) и (9.12) получим выражение для релятивистской кинетической энергии массовой частицы

$$E_к = \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) mc^2. \qquad (9.13)$$

Заметим, что если $v \to c$, то $E_к \to \infty$, что невозможно. Это означает, что скорость массовой частицы всегда меньше скорости света.

Масса частицы из формулы (9.8) имеет вид:

$$m = \frac{1}{c^2}\sqrt{E^2 - p^2c^2}. \qquad (9.14)$$

Если частица покоится, то $m = \frac{E}{c^2}$.

Обратим внимание на то, что так как подкоренное выражение в формуле (9.14) не зависит от выбора системы отсчета, то масса частицы не зависит от ее движения и остается одной и той же величиной во всех инерциальных системах отсчета.

Принцип соответствия. Законы динамики Ньютона и классические представления о пространстве и времени можно рассматривать как частный случай релятивистских законов при скоростях движения, много меньших скорости света.

Это проявление так называемого **принципа соответствия**, согласно которому любая теория, претендующая на более глубокое описание явлений и на более широкую сферу применимости, чем старая, должна включать последнюю как предельный случай.

Принцип соответствия впервые был сформулирован Нильсом Бором применительно к связи квантовой и классической теорий.

Импульс частицы и ее энергия зависят от выбора системы отсчета, масса же всегда остается постоянной. При скоростях много меньших скорости света релятивистские выражения для импульса и энергии переходят в выражения классической механики (принцип соответствия).



1. **Какие величины не изменяются при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой?**
2. **Какие частицы могут двигаться со скоростью света?**
3. **В чем состоит принцип соответствия?**



УПРАЖНЕНИЕ 11

1. С точки зрения наблюдателя, находящегося в движущемся поезде, удары молний в землю в точке A (впереди поезда) и в точке B (позади поезда) произошли одновременно. Какая молния ударила в землю раньше с точки зрения наблюдателя, находящегося на земле?

2. Электрон, ускоренный электрическим полем, приобретает скорость, при которой его полная энергия равна удвоенной энергии покоя. Чему равна ускоряющая разность потенциалов?

3. Может ли электрон в какой-либо среде двигаться со скоростью, превышающей скорость света в данной среде?

КРАТКИЕ ИТОГИ ГЛАВЫ 9

1. Специальная теория относительности Эйнштейна основывается на двух постулатах.
Принцип относительности — главный постулат этой теории. Он гласит: все процессы в природе протекают одинаково во всех инерциальных системах отсчета.

2. Согласно второму постулату скорость света в вакууме одинакова для всех инерциальных систем отсчета. Она не зависит ни от скорости источника, ни от скорости приемника светового сигнала.

3. Теория относительности представляет собой новое учение о пространстве и времени, пришедшее на смену старым классическим представлениям. Согласно теории относительности, понятия одновременности событий, расстояния и промежутки времени являются не абсолютными, а относительными. Они зависят от выбора системы отсчета.

4. Из теории относительности вытекает, что скорость света в вакууме является максимально возможной скоростью передачи взаимодействий в природе.
Соотношение $E^2 - p^2c^2 = E_0^2$ выполняется во всех инерциальных системах отсчета.

5. Основной закон релятивистской динамики можно записать в той же форме, что и второй закон Ньютона:

$$\frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \vec{F}, \text{ но } \vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

6. Важнейшим для ядерной физики и физики элементарных частиц следствием теории относительности является вывод о связи между массой и энергией. Энергия E тела (или системы) тел равна массе, умноженной на квадрат скорости света:

$$E = mc^2.$$

Частица обладает энергией и при скорости равной нулю.

7. При скоростях движения, много меньших скорости света, справедливы классические представления о пространстве и времени и законы механики Ньютона. Это проявление общего принципа соответствия физических теорий.

Глава 10. ИЗЛУЧЕНИЕ И СПЕКТРЫ

§ 80 ВИДЫ ИЗЛУЧЕНИЙ. ИСТОЧНИКИ СВЕТА

Свет — это поток электромагнитных волн с длиной волны $4 \cdot 10^{-7}$—$8 \cdot 10^{-7}$ м. Электромагнитные волны излучаются при ускоренном движении заряженных частиц. Эти заряженные частицы входят в состав атомов, из которых состоит вещество. Но, не зная, как устроен атом, ничего достоверного о механизме излучения сказать нельзя. Ясно лишь, что внутри атома нет света так же, как в струне рояля нет звука. Подобно струне, начинающей звучать только после удара молоточка, атомы могут «рождать» свет только после их возбуждения.

Для того чтобы атом начал излучать, ему необходимо передать определенную энергию. Излучая, атом теряет полученную энергию и для непрерывного свечения вещества необходим приток энергии к его атомам извне.

Тепловое излучение. Наиболее простой и распространенный вид излучения — это тепловое излучение, при котором потери атомами энергии на излучение света компенсируются за счет энергии теплового движения атомов (или молекул) излучающего тела. **Тепловое излучение** — это излучение нагретых тел. Чем выше температура тела, тем быстрее движутся в нем атомы. При столкновении быстрых атомов (или молекул) друг с другом часть их кинетической энергии идет на возбуждение атомов, которые затем излучают свет и переходят в невозбужденное состояние.

Тепловыми источниками излучения являются, например, Солнце и обычная лампа накаливания. Лампа очень удобный, но малоэкономичный источник света. Лишь около 12% всей энергии, выделяемой в нити лампы электри-

ческим током, преобразуется в энергию света. Наконец, тепловым источником света является также пламя. Крупинки сажи (не успевшие сгореть частицы топлива) раскаляются за счет энергии, выделяющейся при сгорании топлива, и испускают свет.

Электролюминесценция. Энергия, необходимая атомам для излучения света, может поступать и из нетепловых источников. При разряде в газах электрическое поле сообщает электронам большую кинетическую энергию. Быстрые электроны испытывают неупругие соударения с атомами. Часть кинетической энергии электронов идет на возбуждение атомов. Возбужденные атомы отдают энергию в виде световых волн. В результате этого разряд в газе сопровождается свечением. Это **электролюминесценция.**

Северное сияние — тоже проявление электролюминесценции. Потоки заряженных частиц, испускаемых Солнцем, захватываются магнитным полем Земли. Они возбуждают у магнитных полюсов Земли атомы верхних слоев атмосферы, из-за чего эти слои светятся. Явление электролюминесценции используется в трубках для рекламных надписей.

Катодолюминесценция. Свечение твердых тел, вызванное бомбардировкой их электронами, называют **катодолюминесценцией.** Благодаря катодолюминесценции светятся экраны электронно-лучевых трубок телевизора.

Хемилюминесценция. При некоторых химических реакциях, идущих с выделением энергии, часть этой энергии непосредственно расходуется на излучение света. Источник света остается холодным (он имеет температуру окружающей среды). Это явление называется **хемилюминесценцией.** Почти каждый из вас, вероятно, знаком с ним. Летом в лесу можно ночью увидеть насекомое — светлячка. На теле у него «горит» маленький зеленый «фонарик». Вы не обожжете пальцев, поймав светлячка. Светящееся пятнышко на его спинке имеет почти ту же температуру, что и окружающий воздух. Свойством светиться обладают и другие живые организмы: бактерии, насекомые, многие рыбы, обитающие на большой глубине. Нередко светятся в темноте кусочки гниющего дерева.

Фотолюминесценция. Падающий на вещество свет частично отражается и частично поглощается. Энергия поглощаемого света в большинстве случаев вызывает лишь нагревание тел. Однако некоторые тела сами начинают светиться непосредственно под действием падающего на них излучения. Это и есть **фотолюминесценция.** Свет возбуждает атомы вещества (увеличивает их внутреннюю энергию), и после этого они высвечиваются сами. Например, светящиеся

Вавилов Сергей Иванович (1891—1951) — советский физик, государственный и общественный деятель, президент АН СССР в 1945—1951 гг. Основные научные труды посвящены физической оптике, и в первую очередь фотолюминесценции. Под его руководством была разработана технология изготовления ламп дневного света и развит метод люминесцентного анализа химического состава веществ. Под его руководством П. А. Черенков открыл в 1934 г. излучение света электронами, движущимися в среде со скоростью, превышающей скорость света в этой среде.



краски, которыми покрывают елочные игрушки, излучают свет после их облучения.

Излучаемый при фотолюминесценции свет имеет, как правило, бо́льшую длину волны, чем свет, возбуждающий свечение. Это можно наблюдать экспериментально. Если направить на сосуд с флюоресцеином (органический краситель) световой пучок, пропущенный через фиолетовый светофильтр, то эта жидкость начинает светиться зелено-желтым светом, т. е. светом с большей длиной волны, чем у фиолетового света.

Явление фотолюминесценции широко используется в лампах дневного света. Советский физик С. И. Вавилов предложил покрывать внутреннюю поверхность разрядной трубки веществами, способными ярко светиться под действием коротковолнового излучения газового разряда. Лампы дневного света примерно в 3—4 раза экономичнее обычных ламп накаливания.

Из перечисленных основных видов излучений самое распространенное — тепловое излучения.



1. **Какие источники света вы знаете?**
2. **Какие виды излучений действовали на вас в прошедшие сутки?**

§ 81 СПЕКТРЫ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ АППАРАТЫ

Распределение энергии в спектре. Ни один из источников не дает *монохроматического света*, т. е. света строго определенной длины волны. В этом нас убеждают опыты по разложению света в спектр с помощью призмы, а также опыты по интерференции и дифракции.

Та энергия, которую несет с собой свет от источника, определенным образом распределена по волнам всех длин волн (или частотам), входящим в состав светового пучка. Плотность потока электромагнитного излучения, или интенсивность I, как известно из § 50, определяется энергией ΔW, приходящейся на все частоты. Для характеристики распределения излучения по частотам нужно ввести новую величину: *интенсивность, приходящуюся на единичный интервал частот*. Эту величину называют **спектральной плотностью потока излучения.** Обозначим ее через $I(\nu)$. Тогда интенсивность излучения, приходящаяся на небольшой спектральный интервал $\Delta\nu$, равна $I(\nu)\Delta\nu$. Суммируя подобные выражения по всем частотам спектра, мы получим плотность потока излучения I.

Спектральную плотность потока излучения на разных частотах можно найти экспериментально. Для этого надо с помощью призмы получить спектр излучения, например электрической дуги, и измерить плотность потока излучения, приходящегося на небольшие спектральные интервалы шириной $\Delta\nu$.

Зрительно оценить (приблизительно) распределение энергии нельзя, так как глаз обладает избирательной чувствительностью к свету: максимум его чувствительности лежит в желто-зеленой области спектра. Лучше всего воспользоваться свойством очень черного тела почти полностью поглощать свет всех длин волн. При этом энергия излучения (т. е. света) вызывает нагревание тела. Поэтому достаточно измерить температуру тела и по ней судить о количестве поглощенной в единицу времени энергии.

По результатам таких опытов можно построить кривую зависимости спектральной плотности интенсивности излучения от частоты (рис. 10.1). Эта кривая даст наглядное представление о распределении энергии в *видимой* части спектра электрической дуги.

Спектральные аппараты. Для точных исследований спектров такие простые приспособления, как узкая щель, ограничивающая световой пучок, или призма, уже недостаточны. Необходимы приборы, дающие четкий спектр, т. е. приборы, хорошо разделяющие волны различной длины и не допускающие (или почти не допускающие) перекрывания отдельных участков спектра. Такие приборы называют **спектральными аппаратами.** Их основной частью является призма или дифракционная решетка.

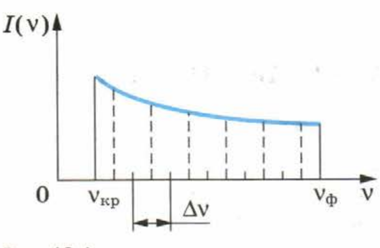


Рис. 10.1

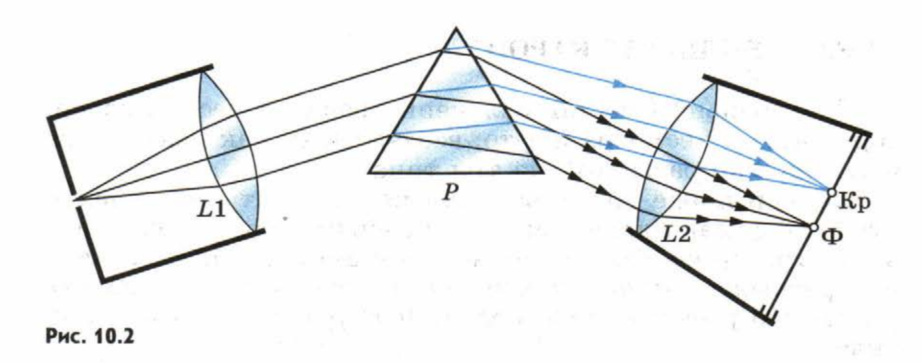


Рис. 10.2

Рассмотрим, например, схему устройства призменного спектрального аппарата (рис. 10.2). Исследуемое излучение поступает вначале в часть прибора, называемую *коллиматором*. Коллиматор представляет собой трубу, на одном конце которой имеется ширма с узкой щелью, а на другом — собирающая линза $L1$. Щель находится на фокусном расстоянии от линзы. Поэтому расходящийся световой пучок, попадающий на линзу из щели, выходит из нее параллельным пучком и падает на призму P.

Так как разным частотам соответствуют различные показатели преломления, то из призмы выходят параллельные пучки, не совпадающие по направлению. Они падают на линзу $L2$. На фокусном расстоянии от этой линзы располагается экран — матовое стекло или фотопластинка. Линза $L2$ фокусирует параллельные пучки лучей на экране, и вместо одного изображения щели получается целый ряд изображений. Каждой частоте (точнее, узкому спектральному интервалу) соответствует свое изображение. Все эти изображения вместе и образуют спектр.

Описанный прибор называется *спектрографом*. Если вместо второй линзы и экрана используется зрительная труба для визуального наблюдения спектров, то прибор называется *спектроскопом*. Призмы и другие детали спектральных аппаратов изготовляются не только из стекла. Вместо стекла применяют и такие прозрачные материалы, как кварц, каменная соль и др.

Вы ознакомились с новой величиной — спектральной плотностью интенсивности излучения, а также с устройством спектрографа.



1. **Что надо изменить в спектральном аппарате, если вместо призмы использовать дифракционную решетку?**
2. **Как зависит интенсивность излучения от частоты в видимой части спектра?**

§ 82 ВИДЫ СПЕКТРОВ

Спектральный состав излучения веществ весьма разнообразен. Но, несмотря на это, все спектры, как показывает опыт, можно разделить на три типа.

Непрерывные спектры. Солнечный спектр или спектр дугового фонаря является непрерывным. Это означает, что в спектре представлены волны всех длин волн. В спектре нет разрывов, и на экране спектрографа можно видеть сплошную разноцветную полосу (см. рис. V, *1* на цветной вклейке).

Распределение энергии по частотам, т. е. спектральная плотность интенсивности излучения, для разных тел различно. Например, тело с очень черной поверхностью излучает электромагнитные волны всех частот, но кривая зависимости спектральной плотности интенсивности излучения от частоты имеет максимум при определенной частоте ν_{max} (рис. 10.3). Энергия излучения, приходящаяся на очень малые ($\nu \to 0$) и очень большие ($\nu \to \infty$) частоты, ничтожно мала. При повышении температуры тела максимум спектральной плотности излучения смещается в сторону коротких волн.

Непрерывные (или **сплошные**) **спектры**, как показывает опыт, дают тела, находящиеся в твердом или жидком состоянии, а также сильно сжатые газы. Для получения непрерывного спектра нужно нагреть тело до высокой температуры.

Характер непрерывного спектра и сам факт его существования не только определяются свойствами отдельных излучающих атомов, но и в сильной степени зависят от взаимодействия атомов друг с другом.

Непрерывный спектр дает также высокотемпературная плазма. Электромагнитные волны излучаются плазмой в основном при столкновениях электронов с ионами.

Линейчатые спектры. Внесем в бледное пламя газовой горелки кусочек асбеста, смоченный раствором обыкновенной поваренной соли. При наблюдении пламени в спектроскоп увидим, как на фоне едва различимого непрерывного спектра пламени вспыхнет яркая желтая линия (см. рис. V, *2* на цветной вклейке). Эту желтую линию дают пары натрия, которые образуются при расщеплении молекул поваренной соли в пламени. На

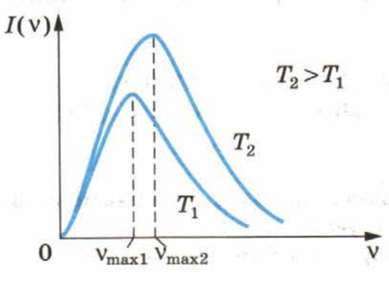


Рис. 10.3

цветной вклейке приведены также спектры водорода и гелия. Каждый из спектров — это частокол цветных линий различной яркости, разделенных широкими темными полосами. Такие спектры называются **линейчатыми**. Наличие линейчатого спектра означает, что вещество излучает свет только вполне определенных длин волн (точнее, в определенных очень узких спектральных интервалах). На рисунке 10.4 показано примерное распределение спектральной плотности интенсивности излучения в линейчатом спектре. Каждая линия имеет конечную ширину.

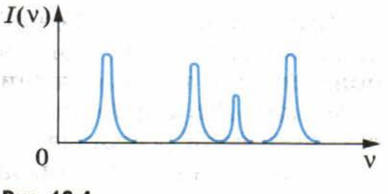


Рис. 10.4

Линейчатые спектры дают все вещества в газообразном атомарном (но не молекулярном) состоянии. В этом случае свет излучают атомы, которые практически не взаимодействуют друг с другом. Это самый фундаментальный, основной тип спектров.

Изолированные атомы излучают свет строго определенных длин волн.

Обычно для наблюдения линейчатых спектров используют свечение паров вещества в пламени или свечение газового разряда в трубке, наполненной исследуемым газом.

При увеличении плотности атомарного газа отдельные спектральные линии расширяются, и, наконец, при очень большом сжатии газа, когда взаимодействие атомов становится существенным, эти линии перекрывают друг друга, образуя непрерывный спектр.

Полосатые спектры. Полосатый спектр состоит из отдельных полос, разделенных темными промежутками. С помощью очень хорошего спектрального аппарата можно обнаружить, что каждая полоса представляет собой совокупность большого числа очень тесно расположенных линий. В отличие от линейчатых спектров **полосатые спектры** образуются не атомами, а молекулами, не связанными или слабо связанными друг с другом.

Для наблюдения молекулярных спектров так же, как и для наблюдения линейчатых спектров, используют свечение паров вещества в пламени или свечение газового разряда.

Спектры поглощения. Все вещества, атомы которых находятся в возбужденном состоянии, излучают световые волны. Энергия этих волн определенным образом распределена по длинам волн. Поглощение света веществом также зависит от длины волны. Так, красное стекло пропускает волны, соответствующие красному свету ($\lambda \approx 8 \cdot 10^{-5}$ см), и поглощает все остальные.

Если пропускать белый свет сквозь холодный, не излучающий газ, то на фоне непрерывного спектра источника появляются темные линии (см. рис. V, *5—8* на цветной вклейке). Газ поглощает наиболее интенсивно свет именно тех длин волн, которые он сам испускает в сильно нагретом состоянии. Темные линии на фоне непрерывного спектра — это линии поглощения, образующие в совокупности **спектр поглощения.**

Существуют непрерывные, линейчатые и полосатые спектры излучения и столько же видов спектров поглощения.



1. Является ли спектр лампы накаливания непрерывным?

2. В чем главное отличие линейчатых спектров от непрерывных и полосатых?

§ 83 СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Линейчатые спектры имеют большое значение, потому что их структура тесно связана со строением атома.

Главное свойство линейчатых спектров в том, что *длины волн (или частоты) линейчатого спектра вещества зависят только от свойств атомов этого вещества, но совершенно не зависят от способа возбуждения свечения атомов*. Атомы любого химического элемента дают спектр, не похожий на спектры всех других элементов: они способны излучать строго определенный набор длин волн.

На этом и основан **спектральный анализ** — метод определения химического состава вещества по его спектру. Подобно отпечаткам пальцев у людей, линейчатые спектры различных элементов имеют неповторимую индивидуальность. Неповторимость узоров на коже пальца помогает часто найти преступника. Точно так же благодаря индивидуальности спектров имеется возможность определить, из каких элементов состоит тело. С помощью спектрального анализа можно обнаружить данный элемент в составе сложного вещества, если даже его масса не превышает 10^{-10} г. Это очень чувствительный метод.

Количественный анализ состава вещества по его спектру затруднен, так как яркость спектральных линий зависит не только от массы вещества, но и от способа возбуждения свечения. Так, при низких температурах многие спектральные линии вообще не появляются. Однако при соблюдении стандартных условий возбуждения свечения можно проводить и количественный (а не только качественный) спектральный анализ.

В настоящее время определены спектры всех атомов и составлены таблицы спектров. С помощью спектрального анализа были открыты многие новые элементы: рубидий, цезий и др. Элементам часто давали названия в соответствии с цветом наиболее интенсивных линий их спектров. Рубидий дает темно-красные, рубиновые линии. Слово *цезий* означает «небесно-голубой». Это цвет основных линий спектра цезия.

Именно с помощью спектрального анализа узнали химический состав Солнца и звезд. Другие методы анализа здесь вообще невозможны. Оказалось, что звезды состоят из тех же самых химических элементов, которые имеются и на Земле. Любопытно, что гелий сначала открыли на Солнце и лишь затем в атмосфере Земли. Название этого элемента напоминает об истории его открытия: слово *гелий* означает «солнечный».

Благодаря сравнительной простоте и универсальности спектральный анализ является основным методом контроля состава вещества в металлургии, машиностроении, атомной индустрии. С помощью спектрального анализа определяют химический состав руд и минералов.

Состав сложных, главным образом органических, смесей анализируется по их молекулярным спектрам.

Спектральный анализ можно проводить не только по спектрам испускания, но и по спектрам поглощения. Именно линии поглощения в спектре Солнца и звезд позволяют исследовать химический состав этих небесных тел. Ярко светящаяся поверхность Солнца — *фотосфера* — дает непрерывный спектр. Солнечная атмосфера поглощает избирательно свет от фотосферы, что приводит к появлению линий поглощения на фоне непрерывного спектра фотосферы.

Но и сама атмосфера Солнца излучает свет. Во время солнечных затмений, когда солнечный диск закрыт Луной, происходит «обращение» линий спектра. На месте линий поглощения в солнечном спектре вспыхивают линии излучения.

В астрофизике под спектральным анализом понимают не только определение химического состава звезд, газовых облаков и т. д., но и методы нахождения по спектрам многих других физических характеристик этих объектов: температуры, давления, скорости движения, магнитной индукции.

Разработано много способов определения состава окружающих нас тел. Но состав звезд и галактик можно узнать только с помощью спектрального анализа.



1. **Какие операции нужно проделать с крупицей вещества, чтобы узнать ее химический состав при помощи спектрального анализа?**
2. **Что определяют по линиям поглощения в солнечном спектре: состав атмосферы Солнца или же состав его глубинных слоев?**

§ 84 ИНФРАКРАСНОЕ И УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

Инфракрасное излучение. Электромагнитное излучение с частотами в диапазоне от $3 \cdot 10^{11}$ до $3{,}75 \cdot 10^{14}$ Гц называется **инфракрасным излучением**. Его испускает любое нагретое тело даже в том случае, когда оно не светится. Например, батареи отопления в квартире испускают инфракрасные волны, вызывающие заметное нагревание окружающих тел. Поэтому инфракрасные волны часто называют *тепловыми*.

Не воспринимаемые глазом инфракрасные волны имеют длины волн, превышающие длину волны красного света (длина волны $\lambda = 780$ нм — 1 мм). Максимум энергии излучения электрической дуги и лампы накаливания приходится на инфракрасные лучи.

Инфракрасное излучение применяют для сушки лакокрасочных покрытий, овощей, фруктов и т. д. Созданы приборы, в которых не видимое глазом инфракрасное изображение объекта преобразуется в видимое. Изготовляются бинокли и оптические прицелы, позволяющие видеть в темноте.

Ультрафиолетовое излучение. Электромагнитное излучение с частотами в диапазоне от $8 \cdot 10^{14}$ до $3 \cdot 10^{16}$ Гц называется **ультрафиолетовым излучением** (длина волны $\lambda = 10$—380 нм).

Обнаружить ультрафиолетовое излучение можно с помощью экрана, покрытого люминесцирующим веществом. Экран начинает светиться в той части, на которую падают лучи, лежащие за фиолетовой областью спектра.

Ультрафиолетовое излучение отличается высокой химической активностью. Повышенную чувствительность к ультрафиолетовому излучению имеет фотоэмульсия. В этом можно убедиться, спроецировав спектр в затемненном помещении на фотобумагу. После проявления бумага почернеет за фиолетовым концом спектра сильнее, чем в области видимого спектра.

Ультрафиолетовые лучи не вызывают зрительных образов: они невидимы. Но действие их на сетчатку глаза и кожу велико и разрушительно. Ультрафиолетовое излучение Солнца недостаточно поглощается верхними слоями атмосферы. Поэтому высоко в горах нельзя оставаться длительное время без одежды и без темных очков. Стеклянные очки, прозрачные для видимого спектра, защищают глаза от ультрафиолетового излучения, так как стекло сильно поглощает ультрафиолетовые лучи.

Впрочем, в малых дозах ультрафиолетовые лучи оказывают целебное действие. Умеренное пребывание на солнце

полезно, особенно в юном возрасте: ультрафиолетовые лучи способствуют росту и укреплению организма. Кроме прямого действия на ткани кожи (образование защитного пигмента — загара, витамина D_2), ультрафиолетовые лучи оказывают влияние на центральную нервную систему, стимулируя ряд важных жизненных функций в организме.

Ультрафиолетовые лучи оказывают также бактерицидное действие. Они убивают болезнетворные бактерии и используются с этой целью в медицине.

Нагретое тело испускает преимущественно инфракрасное излучение с длинами волн, превышающими длины волн видимого излучения. Ультрафиолетовое излучение — более коротковолновое и обладает высокой химической активностью.



1. **Почему солнечный свет, прошедший сквозь оконное стекло, не вызывает загара?**
2. **Известен ли вам какой-либо источник ультрафиолетового излучения?**

§ 85 РЕНТГЕНОВСКИЕ ЛУЧИ

Рентгеновское излучение — это излучение с частотами в диапазоне от $3 \cdot 10^{16}$ до $3 \cdot 10^{20}$ Гц.

Открытие рентгеновских лучей. Рентгеновские лучи были открыты в 1895 г. немецким физиком Вильгельмом Рентгеном. Рентген умел наблюдать, замечать новое там, где многие ученые до него не обнаруживали ничего примечательного. Этот особый дар помог ему сделать замечательное открытие.

Рентген Вильгельм (1845—1923) — немецкий физик, обнаруживший в 1895 г. коротковолновое электромагнитное излучение — рентгеновские лучи. Открытие рентгеновских лучей оказало огромное влияние на все последующее развитие физики, в частности привело к открытию радиоактивности. Ему была присуждена первая Нобелевская премия по физике. Способствовал быстрому распространению практического применения своего открытия в медицине. Конструкция созданной им первой рентгеновской трубки для получения рентгеновских лучей почти не изменилась до настоящего времени.



В конце XIX в. всеобщее внимание физиков привлек газовый разряд при малом давлении. При этих условиях в газоразрядной трубке создавались потоки очень быстрых электронов. В то время их называли катодными лучами. Природа таких лучей еще не была с достоверностью установлена. Известно было лишь, что они берут начало на катоде трубки.

Занявшись исследованием катодных лучей, Рентген скоро заметил, что фотопластинка вблизи разрядной трубки оказывалась засвеченной даже в том случае, когда она была завернута в черную бумагу. После этого ему удалось наблюдать еще одно очень поразившее его явление. Бумажный экран, смоченный раствором платиносинеродистого бария, начинал светиться, если им обертывалась разрядная трубка. Причем когда Рентген держал руку между трубкой и экраном, то на экране были видны темные тени костей на фоне более светлых очертаний всей кисти руки.

Ученый понял, что при работе разрядной трубки возникает какое-то неизвестное ранее сильно проникающее излучение. Он назвал его X-лучами. Впоследствии за этим излучением прочно укрепился термин «рентгеновские лучи».

Рентген обнаружил, что новое излучение появлялось в том месте, где катодные лучи (потоки быстрых электронов) сталкивались со стеклянной стенкой трубки. В этом месте стекло светилось зеленоватым светом.

Последующие опыты показали, что X-лучи возникают при торможении быстрых электронов любым препятствием, в частности металлическими электродами.

Свойства рентгеновских лучей. Лучи, открытые Рентгеном, действовали на фотопластинку, вызывали ионизацию воздуха, но заметным образом не отражались от каких-либо веществ и не испытывали преломления. Электромагнитное поле не оказывало никакого влияния на направление их распространения.

Сразу же возникло предположение, что рентгеновские лучи — это электромагнитные волны, которые излучаются при резком торможении электронов. Большая проникающая способность рентгеновских лучей и прочие их особенности связывались с малой длиной волны. Но эта гипотеза нуждалась в доказательствах, и доказательства были получены спустя 15 лет после смерти Рентгена.

Дифракция рентгеновских лучей. Если рентгеновское излучение представляет собой электромагнитные волны, то оно должно обнаруживать дифракцию — явление, присущее всем видам волн. Сначала пропускали рентгеновские лучи через очень узкие щели в свинцовых пластинках, но ничего похожего на дифракцию обнаружить не удавалось.

Немецкий физик Макс Лауэ предположил, что длина волны рентгеновских лучей слишком мала, для того чтобы можно было обнаружить дифракцию этих волн на искусственно созданных препятствиях. Ведь нельзя сделать щели размером 10^{-8} см, поскольку таковы размеры самих атомов. А что, если рентгеновские лучи имеют примерно такую же длину волны? Тогда остается единственная возможность — использовать кристаллы. Они представляют собой упорядоченные структуры, где расстояния между отдельными атомами по порядку величины равны размерам самих атомов, т. е. 10^{-8} см. Кристалл с его периодической структурой и есть то естественное устройство, которое неизбежно должно вызвать заметную дифракцию волн, если их длина волны близка к размерам атомов.

И вот узкий пучок рентгеновских лучей был направлен на кристалл, за которым располагалась фотопластинка. Результат полностью согласовался с самыми оптимистическими ожиданиями! Наряду с большим центральным пятном, которое давали лучи, распространяющиеся по прямой, возникли регулярно расположенные небольшие пятнышки вокруг центрального пятна (рис. 10.5). Появление этих пятнышек можно было объяснить только дифракцией рентгеновских лучей на упорядоченной структуре кристалла.

Исследование дифракционной картины позволило определить длину волны рентгеновских лучей. Она оказалась меньше длины волны ультрафиолетового излучения и по порядку величины была равна размерам атома.

Применение рентгеновских лучей. Рентгеновские лучи широко используют на практике.

В медицине они применяются для постановки правильного диагноза заболевания, а также для лечения раковых заболеваний.

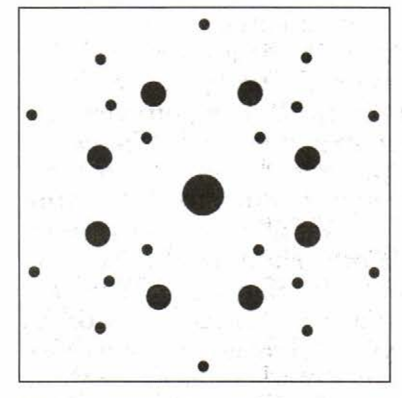


Рис. 10.5

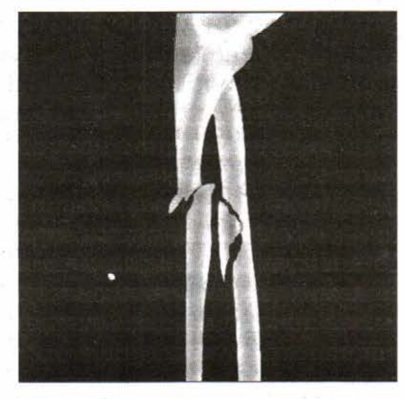


Рис. 10.6

Поглощение рентгеновских лучей пропорционально плотности вещества. Поэтому с помощью рентгеновских лучей можно получать фотографии внутренних органов человека. На этих фотографиях хорошо различимы кости скелета (рис. 10.6) и места перерождений мягких тканей.

Весьма обширны применения рентгеновских лучей в научных исследованиях. По дифракционной картине, даваемой рентгеновскими лучами при их прохождении сквозь кристаллы, удается установить порядок расположения атомов в пространстве — структуру кристаллов. Сделать это для неорганических кристаллических веществ оказалось не очень сложным. Но с помощью рентгеноструктурного анализа можно расшифровать также строение сложнейших органических соединений, в том числе белков. В частности, была определена структура молекулы гемоглобина, содержащей десятки тысяч атомов.

Эти достижения стали возможны благодаря тому, что длина волны рентгеновских лучей очень мала, именно поэтому удалось «увидеть» молекулярные структуры, а именно: получить дифракционную картину, с помощью которой после ее расшифровки можно восстановить характер пространственного расположения атомов.

Из других применений рентгеновских лучей отметим еще рентгеновскую *дефектоскопию* — метод обнаружения раковин в отливках, трещин в рельсах, проверки качества сварных швов и т. д. Рентгеновская дефектоскопия основана на изменении поглощения рентгеновских лучей в изделии при наличии в нем полостей или инородных включений.

Устройство рентгеновской трубки. В настоящее время для получения рентгеновских лучей разработаны весьма совершенные устройства, называемые **рентгеновскими трубками**.

На рисунке 10.7 изображена упрощенная схема электронной рентгеновской трубки. Катод *1* представляет собой вольфрамовую спираль, испускающую электроны за счет термоэлектронной эмиссии. Цилиндр *3* фокусирует поток электронов, которые затем соударяются с металлическим электродом (анодом) *2*. При этом появляются рентгеновские лучи. Напряжение между анодом и катодом достигает нескольких десятков киловольт. В трубке создается глубокий вакуум; давление газа в ней не превышает 10^{-5} мм рт. ст.

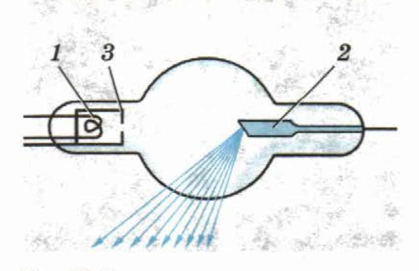


Рис. 10.7

В мощных рентгеновских трубках анод охлаждается проточной водой, так как при торможении электронов выделяется большое количество теплоты. В полезное излучение превращается лишь около 3% энергии электронов.

Гамма-лучи. По своим свойствам γ-лучи очень сильно напоминают рентгеновские, но только их проникающая способность гораздо больше, чем у рентгеновских лучей. Это наводило на мысль, что γ-лучи представляют собой электромагнитные волны. Все сомнения в этом отпали после того, как была обнаружена дифракция γ-лучей на кристаллах и измерена их длина волны. Она оказалась очень малой — от 10^{-8} до 10^{-11} см.

На шкале электромагнитных волн γ-лучи следуют непосредственно за рентгеновскими. Скорость распространения γ-лучей такая же, как у всех электромагнитных волн, — около 300 000 км/с.

Рентгеновское излучение широко используется в медицине, для научных исследований. Рентгеновские лучи, как и γ-излучение — электромагнитные волны с малой длиной волны.



1. Как устроена рентгеновская трубка?
2. Почему трудно изготовить рентгеновский микроскоп?

§ 86 ШКАЛА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Мы знаем, что длина электромагнитных волн бывает самой различной: от 10^3 м (радиоволны) до 10^{-10} м (рентгеновские лучи). Свет составляет ничтожную часть широкого спектра электромагнитных волн. При изучении этой малой части спектра были открыты другие излучения с необычными свойствами.

На форзацах изображена полная шкала электромагнитных волн с указанием длин волн и частот различных излучений, а также устройства, с помощью которых получают электромагнитные волны разных диапазонов частот.

Принято выделять: *низкочастотное излучение, радиоизлучение, инфракрасные лучи, видимый свет, ультрафиолетовые лучи, рентгеновские лучи и γ-излучение.*

Принципиального различия между отдельными излучениями нет. Все они представляют собой электромагнитные волны, порождаемые заряженными частицами. Обнаруживаются электромагнитные волны в основном по их действию на заряженные частицы. В вакууме электромагнит-

ное излучение любой длины волны распространяется со скоростью 300 000 км/с. Границы между отдельными областями шкалы излучений весьма условны.

Излучения различных длин волн отличаются друг от друга по способам их получения (излучение антенны, тепловое излучение, излучение при торможении быстрых электронов и др.) и методам регистрации.

Все перечисленные виды электромагнитного излучения порождаются также космическими объектами и успешно исследуются с помощью ракет, искусственных спутников Земли и космических кораблей. В первую очередь это относится к рентгеновскому и γ-излучениям, сильно поглощаемым атмосферой. По мере уменьшения длины волны *количественные различия в длинах волн приводят к существенным качественным различиям.*

Излучения различной длины волны очень сильно отличаются друг от друга по поглощению их веществом. Коротковолновые излучения (рентгеновское и особенно γ-лучи) поглощаются слабо. Непрозрачные для волн оптического диапазона вещества прозрачны для этих излучений.

Коэффициент отражения электромагнитных волн также зависит от длины волны.

Длина электромагнитных волн изменяется в широком диапазоне. Независимо от длины волны все электромагнитные волны обладают одинаковыми свойствами. Существенные различия наблюдаются при взаимодействии с веществом: коэффициенты поглощения и отражения зависят от длины волны.



1. **Какими способами регистрируются радиоволны? излучения оптического диапазона? рентгеновские лучи?**
2. **Чем различаются виды электромагнитных излучений при их взаимодействии с веществом?**

КРАТКИЕ ИТОГИ ГЛАВЫ 10

1. Свет излучается заряженными частицами — электронами, движущимися в атомах. Для того чтобы атом мог излучать, он должен получить энергию извне.
2. Наиболее распространены тепловые источники света: Солнце, электрические лампы накаливания, пламя и др. Важнейшая характеристика излучения — распределение его энергии по частотам или длинам волн. Это распределение характеризуется спектральной плотностью интенсивности излучения.

3. Спектры излучения исследуются с помощью спектральных аппаратов. Основным элементом спектрального аппарата является призма или дифракционная решетка.

4. Излучение, испускаемое твердыми и жидкими телами, а также высокотемпературной плазмой, имеет непрерывный спектр. В непрерывном спектре представлены с различной интенсивностью все длины волн.

5. Излучение, испускаемое веществом в газообразном атомарном состоянии, имеет линейчатый спектр. Длины волн линейчатого спектра зависят только от свойств атомов вещества и не зависят от способов возбуждения атомов. На этом факте основан спектральный анализ.

6. Спектр излучения молекул состоит из отдельных полос, разделенных темными промежутками. Такой спектр называется полосатым.

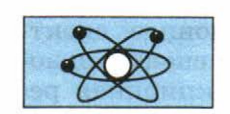
7. Поглощение света веществом зависит от длины волны. Вещество наиболее интенсивно поглощает свет как раз тех длин волн, на которых оно интенсивно испускает энергию в сильно нагретом состоянии. По линиям поглощения определяют химический состав Солнца и звезд.

8. Свет — это электромагнитные волны с длинами волн от $4 \cdot 10^{-7}$ до $8 \cdot 10^{-7}$ м. Излучение с длинами волн, превышающими длину волны красного света ($\lambda = 8 \cdot 10^{-7}$ м), называют инфракрасным. Инфракрасные лучи испускает любое нагретое тело.

9. Электромагнитные волны с длинами волн, меньшими $4 \cdot 10^{-7}$ м, называют ультрафиолетовыми. Эти лучи отличаются большой химической активностью.

10. Длины волн рентгеновских лучей порядка размеров атомов. Рентгеновские лучи возникают при резком торможении электронов, прошедших ускоряющее напряжение в несколько киловольт. Эти лучи слабо поглощаются веществом. Их используют в медицине (рентгенодиагностика и рентгенотерапия), в технике (рентгенодефектоскопия) и в научных исследованиях.

11. Шкала электромагнитных волн простирается от длинных радиоволн ($\lambda > 1$ км) до γ-лучей ($\lambda < 10^{-10}$ м). Электромагнитные волны с различной длиной волны условно делят на диапазоны по разным признакам (способу получения, способу регистрации, характеру взаимодействия с веществом). Различия в длинах волн приводят к существенным качественным различиям. Коротковолновое излучение обнаруживает свойства частиц.



КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

Величайшая революция в физике совпала с началом XX в. Попытки объяснить наблюдаемые на опытах (см. рис. 10.3) закономерности распределения энергии в спектрах теплового излучения (электромагнитного излучения нагретого тела) оказались несостоятельными. Многократно проверенные законы электромагнетизма Максвелла неожиданно «забастовали», когда их попытались применить к проблеме излучения веществом коротких электромагнитных волн. И это было тем более удивительно, что эти законы превосходно описывали излучение радиоволн антенной и что в свое время само существование электромагнитных волн было предсказано на основе этих законов.

Согласно теории Максвелла, колеблющиеся электрические заряды испускают электромагнитные волны. Тогда излучение нагретых тел может быть объяснено колебаниями электрических зарядов в молекулах вещества. При этом плотность излучаемой энергии должна увеличиваться с частотой. Однако опыт показывает, что при больших частотах плотность энергии становится малой, о чем свидетельствует характер спектра электромагнитного излучения.

В поисках выхода из этого противоречия между теорией и опытом немецкий физик Макс Планк предположил, что атомы испускают электромагнитную энергию не непрерывно, а отдельными порциями — **квантами**. Энергия E каждой порции прямо пропорциональна частоте ν излучения:

$$E = h\nu.$$

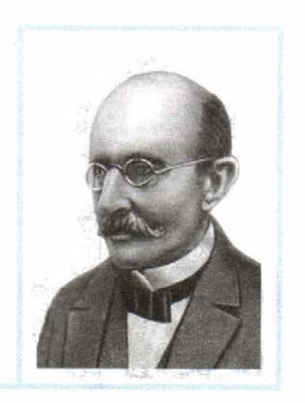
Коэффициент пропорциональности h получил название **постоянной Планка**.

Предположение Планка фактически означало, что законы классической физики совершенно неприменимы к явлениям микромира.

Разработанная Планком теория теплового излучения превосходно согласовывалась с экспериментом. По известному из опыта распределению энергии по частотам было определено значение постоянной Планка. Оно оказалось очень малым:

$$h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{Дж} \cdot \text{с}.$$

Планк Макс (1858—1947) — великий немецкий физик-теоретик, основатель квантовой теории — современной теории движения, взаимодействия и взаимных превращений микроскопических частиц. В 1900 г. в работе по исследованию равновесного теплового излучения впервые предположил, что энергия осциллятора (системы, совершающей гармонические колебания) принимает дискретные значения, пропорциональные частоте колебаний; излучается электромагнитная энергия осциллятором отдельными порциями. Большой вклад внес в развитие термодинамики.



После открытия Планка начала развиваться новая, самая современная и глубокая физическая теория — квантовая теория. Развитие ее не завершено и по сей день.

Планк указал путь выхода из трудностей, с которыми столкнулась теория теплового излучения. Но этот успех был обеспечен ценой отказа от законов классической физики применительно к микроскопическим системам и излучению.

Глава 11. СВЕТОВЫЕ КВАНТЫ

Квантовым законам подчиняется поведение всех микрочастиц. Но впервые квантовые свойства материи были обнаружены именно при исследовании излучения и поглощения света.

§ 87 ФОТОЭФФЕКТ

В развитии представлений о природе света важный шаг был сделан при изучении одного замечательного явления, открытого Г. Герцем и тщательно исследованного выдающимся русским физиком Александром Григорьевичем Столетовым. Явление это получило название фотоэффекта.

Фотоэффект — это испускание электронов из вещества под действием падающего на него света.

Наблюдение фотоэффекта. Для обнаружения фотоэффекта на опыте можно использовать электрометр с присоединенной к нему цинковой пластиной (рис. 11.1). Если зарядить пластину положительно, то ее освещение, например электрической дугой, не влияет на быстроту разрядки электрометра. Но если пластину зарядить отрицательно, то световой пучок от дуги разряжает электрометр очень быстро.



Столетов Александр Григорьевич (1839—1896) — русский физик. Исследование фотоэффекта принесло ему мировую известность. Показал также возможность применения фотоэффекта на практике. В докторской диссертации «Исследования о функции намагничения мягкого железа» разработал метод исследования ферромагнетиков и установил вид кривой намагничения. Эта работа широко использовалась на практике при конструировании электрических машин. Был инициатором создания Физического института при Московском университете.

Объяснить это можно так. Свет вырывает электроны с поверхности пластины. Если пластина заряжена отрицательно, электроны отталкиваются от нее, и электрометр разряжается. При положительном же заряде пластины вырванные светом электроны притягиваются к пластине и снова оседают на ней. Поэтому заряд электрометра в этом случае не изменяется.

Однако, когда на пути света поставлено обыкновенное стекло, отрицательно заряженная пластина уже не теряет электроны, какова бы ни была интенсивность излучения. Так как известно, что стекло поглощает ультрафиолетовые лучи, то из этого опыта можно заключить: именно ультрафиолетовый участок спектра вызывает фотоэффект. Этот простой факт нельзя объяснить на основе волновой теории света. Ведь непонятно, почему световые волны малой частоты не могут вырывать электроны, если даже амплитуда волны велика и, следовательно, велика сила, действующая на электроны.

Законы фотоэффекта. Для того чтобы получить о фотоэффекте более полное представление, нужно было выяснить, от чего зависит число вырванных светом с поверхности вещества электронов (фотоэлектронов) и чем определяется их скорость или кинетическая энергия. С этой целью были продолжены экспериментальные исследования.

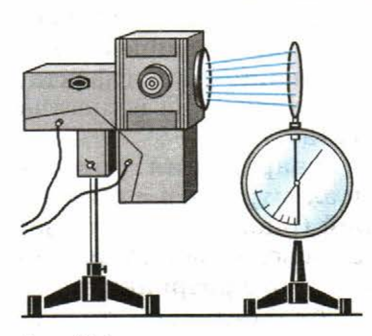


Рис. 11.1

В стеклянный баллон, из которого выкачан воздух, помещаются два электрода (рис. 11.2). Внутрь баллона на один из электродов поступает свет через кварцевое окошко, прозрачное не только для видимого света, но и для ультрафиолетового излучения. На

электроды подается напряжение, которое можно менять с помощью потенциометра и измерять вольтметром. К освещаемому электроду присоединяется отрицательный полюс батареи. Под действием света этот электрод испускает электроны, которые при движении в электрическом поле образуют электрический ток. При малых напряжениях не все вырванные светом электроны достигают другого электрода. Если, не меняя интенсивности излучения, увеличивать разность потенциалов между электродами, то сила тока возрастает. При некотором напряжении она достигает максимального значения, после чего перестает увеличиваться (рис. 11.3). Максимальное значение силы тока $I_н$ называется **током насыщения.** Сила тока насыщения определяется числом электронов, испускаемых за 1 с освещаемым электродом.

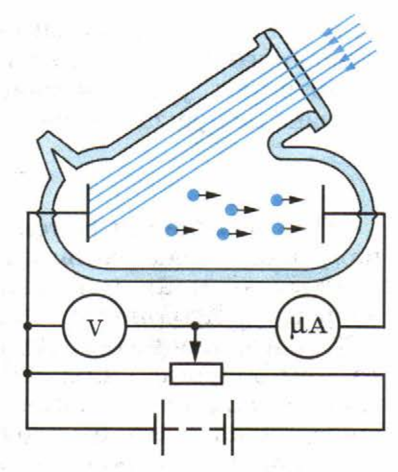


Рис. 11.2

Изменяя в этом опыте интенсивность излучения, удалось установить, что число электронов, вырываемых светом с поверхности металла за 1 с, прямо пропорционально поглощаемой за это время энергии световой волны.

На основании результатов этого опыта можно сформулировать **первый закон фотоэффекта:** ***фототок насыщения прямо пропорционален падающему световому потоку*** **Ф.**

Теперь остановимся на измерении кинетической энергии (или скорости) электронов. Из графика, приведенного на рисунке 11.3, видно, что сила фототока отлична от нуля и при нулевом напряжении. Это означает, что часть вырванных светом электронов достигает правого (см. рис. 11.2) электрода и при отсутствии напряжения. Если изменить полярность батареи, то сила тока уменьшится, и при некотором напряжении $U_з$ обратной полярности она станет равной нулю. Это значит, что электрическое поле тормозит вырванные электроны до полной остановки, а затем возвращает их на электрод.

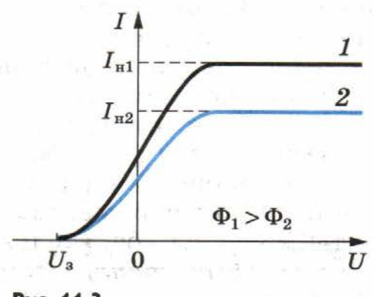


Рис. 11.3

Задерживающее напряжение $U_з$ зависит от максимальной кинетической энергии, ко-

торую имеют вырванные светом электроны. Измеряя задерживающее напряжение и применяя теорему о кинетической энергии (см. учебник физики для 10 класса), можно найти максимальное значение кинетической энергии электронов:

$$\frac{mv^2}{2} = eU_з.$$

При изменении интенсивности света (плотности потока излучения) задерживающее напряжение, как показали опыты, не меняется. Значит, не меняется кинетическая энергия электронов. С точки зрения волновой теории света этот факт непонятен. Ведь чем больше интенсивность света, тем бо́льшие силы действуют на электроны со стороны электромагнитного поля световой волны и тем бо́льшая энергия, казалось бы, должна передаваться электронам.

На опытах было обнаружено, что кинетическая энергия вырываемых светом электронов зависит только от частоты света.

Второй закон фотоэффекта: ***максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно растет с частотой света и не зависит от его интенсивности.***

Если частота света меньше определенной для данного вещества минимальной частоты ν_{min}, то фотоэффекта не происходит.

Законы фотоэффекта просты по форме. Но зависимость кинетической энергии вырванных светом электронов от частоты света требует объяснения.



1. **Чему равна постоянная Планка?**
2. **В чем состоят основные законы фотоэффекта?**

§ 88 ТЕОРИЯ ФОТОЭФФЕКТА

Все попытки объяснить явление фотоэффекта на основе законов электродинамики Максвелла, согласно которым свет — это электромагнитная волна, непрерывно распределенная в пространстве, оказались безрезультатными. Нельзя было понять, почему энергия фотоэлектронов определяется только частотой света и почему лишь при достаточно малой длине волны свет вырывает электроны.

Объяснение фотоэффекта было дано в 1905 г. Эйнштейном, развившим идеи Планка о прерывистом испускании света. В экспериментальных законах фотоэффекта Эйнштейн увидел убедительное доказательство того, что *свет имеет прерывистую структуру и поглощается отдельными порциями.*

Энергия E каждой порции излучения в полном соответствии с гипотезой Планка пропорциональна частоте:

$$E = h\nu, \tag{11.1}$$

где h — постоянная Планка.

Из того, что свет излучается порциями, еще не вытекает вывода о прерывистости структуры самого света. Ведь и минеральную воду продают в бутылках, но отсюда не следует, что вода состоит из неделимых частей.

Лишь явление фотоэффекта показало, что *свет имеет прерывистую структуру: излученная порция световой энергии $E = h\nu$ сохраняет свою индивидуальность и в дальнейшем.* Поглотиться может только вся порция целиком.

Кинетическую энергию фотоэлектрона можно найти, применив закон сохранения энергии. Энергия порции света $h\nu$ идет на совершение *работы выхода A* и на сообщение электрону кинетической энергии.

Следовательно,

$$\boxed{h\nu = A + \frac{mv^2}{2}.} \tag{11.2}$$

Работа выхода — это минимальная энергия, которую надо сообщить электрону, чтобы он покинул металл. Уравнение (11.2) объясняет основные факты, касающиеся фотоэффекта. Интенсивность света, по Эйнштейну, пропорциональна числу квантов (порций) энергии $h\nu$ в световом пучке и поэтому определяет число электронов, вырванных из металла. Скорость же электронов v согласно формуле (11.2) определяется только частотой света ν и работой выхода A, зависящей от типа металла и состояния его поверхности. От интенсивности света скорость не зависит.

Для каждого вещества фотоэффект наблюдается лишь в том случае, если частота ν света больше некоторого минимального значения ν_{min}. Ведь, чтобы вырвать электрон из металла даже без сообщения ему кинетической энергии, нужно совершить работу выхода A. Следовательно, энергия кванта должна быть больше этой работы:

$$h\nu > A.$$

Предельную частоту ν_{min} и предельную длину волны λ_{max} называют **красной границей фотоэффекта**. Они выражаются так:

$$\nu_{min} = \frac{A}{h}, \quad \lambda_{max} = \lambda_{кр} = \frac{hc}{A}, \tag{11.3}$$

где λ_{max} ($\lambda_{кр}$) — максимальная длина волны, при которой фотоэффект еще наблюдается. Это название появилось по ана-

логии со световыми волнами, так как максимальная длина волны видимого света соответствует *красному* цвету.

Работа выхода A зависит от рода вещества. Поэтому и предельная частота ν_{min} фотоэффекта (красная граница) для разных веществ различна.

Третий закон фотоэффекта: ***для каждого вещества существует максимальная длина волны, при которой фотоэффект еще наблюдается. При бо́льших длинах волн фотоэффекта нет.***

Для цинка красной границе соответствует длина волны $\lambda_{max} = 3{,}7 \cdot 10^{-7}$ м (ультрафиолетовое излучение).

Именно этим объясняется опыт по прекращению фотоэффекта с помощью стеклянной пластинки, задерживающей ультрафиолетовые лучи. Работа выхода у алюминия или железа больше, чем у цинка. У щелочных металлов работа выхода, напротив, меньше, а длина волны λ_{max}, соответствующая красной границе, больше. Так, для натрия $\lambda_{max} = 6{,}8 \cdot 10^{-7}$ м.

Пользуясь уравнением Эйнштейна (11.2), можно найти постоянную Планка h. Для этого нужно экспериментально определить частоту света ν, работу выхода A и измерить кинетическую энергию фотоэлектронов. Подобные измерения и расчеты дают $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с. Точно такое же значение было найдено и самим Планком при теоретическом изучении совершенно другого явления — теплового излучения. Совпадение значений постоянной Планка, полученных различными методами, дополнительно подтверждает правильность предположения о прерывистом характере излучения и поглощения света веществом.

Уравнение Эйнштейна (11.2), несмотря на его кажущуюся простоту, объясняет основные закономерности фотоэффекта. Эйнштейн был удостоен Нобелевской премии за работы по теории фотоэффекта.



1. **Какие факты свидетельствуют о наличии у света корпускулярных свойств?**
2. **Что такое красная граница фотоэффекта?**

§ 89 ФОТОНЫ

В современной физике фотон рассматривается как одна из элементарных частиц.

Энергия и импульс фотона. При испускании и поглощении свет ведет себя подобно потоку частиц с энергией $E = h\nu$, зависящей от частоты. Порция света оказалась не-

ожиданно очень похожей на то, что принято называть частицей. Свойства света, обнаруживаемые при его излучении и поглощении, назвали **корпускулярными**. Сама же световая частица была названа **фотоном**, или **квантом электромагнитного излучения**.

Фотон, подобно частице, обладает определенной порцией энергии $h\nu$. Энергию фотона часто выражают не через частоту ν, а через циклическую частоту $\omega = 2\pi\nu$. При этом в формуле для энергии фотона в качестве коэффициента пропорциональности вместо величины h используют величину $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ (читается: аш с чертой), равную, по современным данным, $\hbar = 1{,}0545726 \cdot 10^{-34}$ Дж · с (последние два знака определены с точностью до ±40). Тогда энергия фотона выражается так:

$$E = h\nu = \hbar\omega. \qquad (11.4)$$

Согласно теории относительности энергия всегда связана с массой соотношением $E = mc^2$. Так как энергия фотона равна $h\nu$, то, следовательно, его масса m получается равной

$$m = \frac{h\nu}{c^2}. \qquad (11.5)$$

У фотона нет собственной массы, он не существует в состоянии покоя и при рождении сразу имеет скорость c. Масса, определяемая формулой (11.5), — это масса движущегося фотона. По известной массе и скорости фотона можно найти его импульс:

$$p = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}. \qquad (11.6)$$

Направление импульса фотона совпадает с направлением светового луча.

Чем больше частота ν, тем больше энергия E и импульс p фотона и тем отчетливее проявляются корпускулярные свойства света. Из-за того что постоянная Планка мала, энергия фотонов видимого излучения крайне незначительна. Фотоны, соответствующие зеленому свету, имеют энергию $4 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Тем не менее, в своих замечательных опытах С. И. Вавилов установил, что человеческий глаз, этот точнейший из «приборов», способен реагировать на различие освещенностей, измеряемое единичными квантами.

Корпускулярно-волновой дуализм. Законы теплового излучения и фотоэффекта можно объяснить только на основе представления, согласно которому свет — это поток час-

тиц-фотонов. Однако явления интерференции и дифракции света свидетельствуют и о волновых свойствах света. Свет обладает, таким образом, своеобразным *дуализмом* (двойственностью) свойств. При распространении света проявляются его волновые свойства, а при взаимодействии с веществом (излучении и поглощении) — корпускулярные. Это, конечно, странно и непривычно, так как частица и волна абсолютно разные физические объекты. Мы не имеем возможности представлять себе наглядно в полной мере процессы в микромире, так как они совершенно отличны от тех макроскопических явлений, которые люди наблюдали на протяжении миллионов лет и основные законы которых были сформулированы к концу XIX в.

Гипотеза де Бройля. Если с электромагнитным полем длительное время связывалось представление о материи, непрерывно распределенной в пространстве, то электроны, напротив, представлялись как некоторые крохотные комочки материи. Это подчеркивалось уже самим названием «частица», постоянно присутствующим рядом со словом «электрон».

Не допускаем ли мы здесь ошибки, обратной той, которая была сделана со светом? Может быть, электрон и другие частицы обладают также и волновыми свойствами. Такую необычную мысль высказал в 1923 г. французский ученый Луи де Бройль.

Предположив, что с движением частиц связано распространение некоторых волн, де Бройль сумел найти длину волны этих волн. Связь длины волны с импульсом частицы оказалась точно такой же, как и у фотонов (см. формулу (11.6)). Если длину волны обозначить через λ, а импульс — через p, то

$$\lambda = \frac{h}{p}. \qquad (11.7)$$

Эта знаменитая формула де Бройля — одна из основных в физике микромира.

Предсказанные де Бройлем волновые свойства частиц впоследствии были обнаружены экспериментально. Наблюдалась, в частности, дифракция электронов и других частиц на кристаллах. В этих случаях получалась картина, подобная той, которая характерна для рентгеновских лучей, причем справедливость формулы де Бройля (11.7) была доказана экспериментально.

Эти необычные свойства микрообъектов описываются с помощью **квантовой механики** — современной теории движения микрочастиц. Механика Ньютона здесь в большинстве случаев неприменима.

Фотон — элементарная частица, не имеющая массы покоя и электрического заряда, но обладающая энергией и импульсом. Это квант электромагнитного поля, которое осуществляет взаимодействие между заряженными частицами. Поглощение и излучение электромагнитной энергии отдельными порциями — проявление корпускулярных свойств электромагнитного поля.

Корпускулярно-волновой дуализм — общее свойство материи, проявляющееся на микроскопическом уровне.



1. **Как определить энергию, массу и импульс фотона, зная частоту световой волны?**
2. **Что понимается под словами** *корпускулярно-волновой дуализм*?

§ 90 ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОЭФФЕКТА

Открытие фотоэффекта имело очень большое значение для более глубокого понимания природы света. Но ценность науки состоит не только в том, что она выясняет сложное и многообразное строение окружающего нас мира, но и в том, что она дает нам в руки средства, используя которые можно совершенствовать производство, улучшать условия материальной и культурной жизни общества.

С помощью фотоэффекта «заговорило» кино, стала возможной передача движущихся изображений (телевидение). Применение фотоэлектронных приборов позволило создать станки, которые без участия человека изготовляют детали по заданным чертежам. Основанные на фотоэффекте приборы контролируют размеры изделий лучше человека, вовремя включают и выключают маяки и уличное освещение и т. п.

Все это оказалось возможным благодаря изобретению особых устройств — *фотоэлементов*, в которых энергия света управляет энергией электрического тока или преобразуется в нее.

Вакуумные фотоэлементы. Современный вакуумный фотоэлемент представляет собой стеклянную колбу, часть внутренней поверхности которой покрыта тонким слоем металла с малой работой выхода (рис. 11.4). Это катод *1*. Через прозрачное окошко свет проникает внутрь колбы.

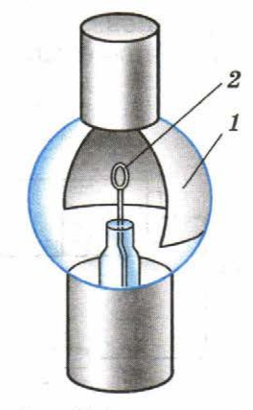


Рис. 11.4

В ее центре расположена проволочная петля или диск — анод *2*, который слу-

жит для улавливания фотоэлектронов. Анод присоединяют к положительному полюсу батареи. Фотоэлементы реагируют на видимое излучение и даже на инфракрасные лучи.

При попадании света на катод фотоэлемента в цепи возникает электрический ток, который включает или выключает реле. Комбинация фотоэлемента с реле позволяет конструировать множество различных «видящих» автоматов. Одним из них является автомат в метро. Он срабатывает (выдвигает перегородку) при пересечении светового пучка, если предварительно не пропущена карточка.

Подобные автоматы могут предотвращать аварии. На заводе фотоэлемент почти мгновенно останавливает мощный пресс, если рука человека оказывается в опасной зоне.

С помощью фотоэлементов воспроизводится звук, записанный на кинопленке.

Полупроводниковые фотоэлементы. Кроме рассмотренного в этой главе фотоэффекта, называемого более полно *внешним фотоэффектом*, широко применяется и так называемый *внутренний фотоэффект* в полупроводниках. На этом явлении основано устройство фоторезисторов — приборов, сопротивление которых зависит от освещенности. Кроме того, сконструированы полупроводниковые фотоэлементы, создающие ЭДС и непосредственно преобразующие энергию излучения в энергию электрического тока. ЭДС, называемая в данном случае фотоЭДС, возникает в области p—n-перехода двух полупроводников при облучении этой области светом.

Под действием света образуются пары электрон — дырка. В области p—n-перехода существует электрическое поле. Это поле заставляет неосновные носители полупроводников перемещаться через контакт. Дырки из полупроводника n-типа перемещаются в полупроводник p-типа, а электроны из полупроводника p-типа — в область n-типа, что приводит к накоплению основных носителей в полупроводниках n- и p-типов. В результате потенциал полупроводника p-типа увеличивается, а n-типа уменьшается. Это происходит до тех пор, пока ток неосновных носителей через p—n-переход не сравняется с током основных носителей через этот же переход. Между полупроводниками устанавливается разность потенциалов, равная фотоЭДС.

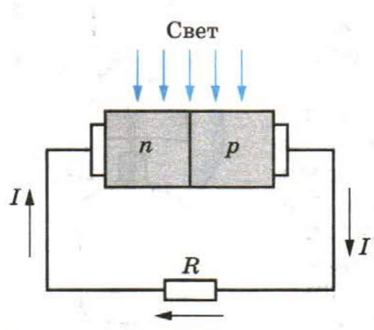


Рис. 11.5

Если замкнуть цепь через внешнюю нагрузку, то в цепи пойдет ток, определяемый разностью токов неосновных и основных носителей через p—n-пе-

реход (рис. 11.5). Сила тока зависит от интенсивности падающего света и сопротивления нагрузки R. Фотоэлементы с p—n-переходом создают ЭДС порядка 1—2 В. Их выходная мощность достигает сотен ватт при коэффициенте полезного действия до 20%.

Фотоэлементы малой мощности используются, например, в фотоэкспонометрах. Особенно широко применяются полупроводниковые фотоэлементы при изготовлении солнечных батарей, устанавливаемых на космических кораблях (рис. 11.6). К сожалению, пока такие батареи довольно дороги.

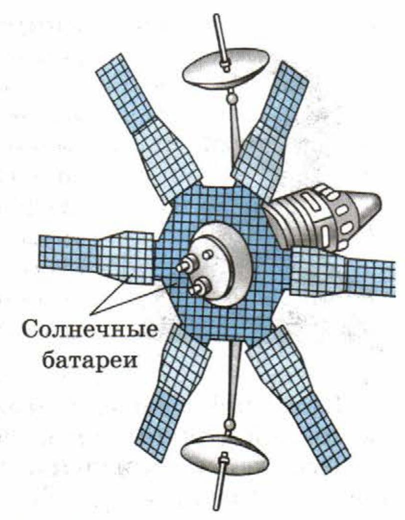


Рис. 11.6

Широко применяются вакуумные и полупроводниковые фотоэлементы, которые создают фотоЭДС.

§ 91 ДАВЛЕНИЕ СВЕТА

Максвелл на основе электромагнитной теории света предсказал, что свет должен оказывать давление на препятствия.

Под действием электрического поля волны, падающей на поверхность тела, например металла, свободный электрон движется в сторону, противоположную вектору $\vec{E}$ (рис. 11.7). На движущийся электрон действует сила Лоренца $\vec{F}$, направленная в сторону распространения волны. Суммарная сила, действующая на электроны поверхности металла, и определяет **силу светового давления**.

Для доказательства справедливости теории Максвелла было важно измерить давление света. Многие ученые пытались это сделать, но безуспешно, так как световое давление очень мало. В яркий солнечный день на поверхности площадью 1 м^2 действует сила, равная всего лишь $4 \cdot 10^{-6}$ Н. Впервые давление света измерил русский физик Петр Николаевич Лебедев в 1900 г.

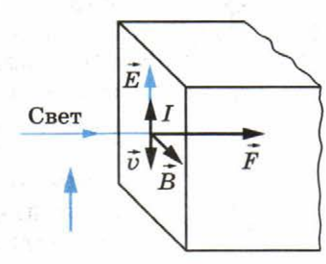


Рис. 11.7



Лебедев Петр Николаевич (1866—1912) — русский физик, впервые измеривший давление света на твердые тела и газы. Эти работы количественно подтвердили теорию Максвелла. Стремясь найти новые экспериментальные доказательства электромагнитной теории света, получил электромагнитные волны миллиметровой длины волны и исследовал все их свойства. Создал первую в России физическую школу. Его учениками были многие выдающиеся советские ученые. Имя Лебедева носит физический институт АН СССР (ФИАН).

Прибор Лебедева состоял из очень легкого стерженька на тонкой стеклянной нити, по краям которого были приклеены легкие крылышки (рис. 11.8). Весь прибор помещался в сосуд, откуда был выкачан воздух. Свет падал на крылышки, расположенные по одну сторону от стерженька. О значении давления можно было судить по углу закручивания нити. Трудности точного измерения давления света были связаны с невозможностью выкачать из сосуда весь воздух (движение молекул воздуха, вызванное неодинаковым нагревом крылышек и стенок сосуда, приводит к возникновению дополнительных вращающих моментов). Кроме того, на закручивание нити влияет неодинаковый нагрев сторон крылышек (сторона, обращенная к источнику света, нагревается сильнее, чем противоположная сторона). Молекулы, отражающиеся от более нагретой стороны, передают крылышку больший импульс, чем молекулы, отражающиеся от менее нагретой стороны.

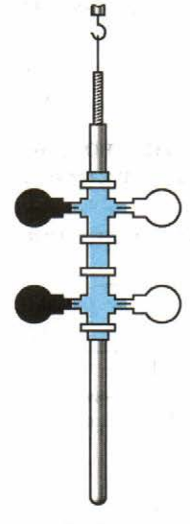


Рис. 11.8

Лебедев сумел преодолеть все эти трудности, несмотря на низкий уровень тогдашней экспериментальной техники, взяв очень большой сосуд и очень тонкие крылышки. В конце концов существование светового давления на твердые тела было доказано, и оно было измерено. Полученное значение совпало с предсказанным Максвеллом. Впоследствии после трех лет работы Лебедеву удалось осуществить еще более тонкий эксперимент: измерить давление света на газы.

Появление квантовой теории света позволило более просто объяснить причину светового давления. Фотоны, подобно частицам вещества, имеющим массу покоя, обладают импульсом. При поглощении их телом они

передают ему свой импульс. Согласно закону сохранения импульса импульс тела становится равным импульсу поглощенных фотонов. Поэтому покоящееся тело приходит в движение. Изменение импульса тела означает согласно второму закону Ньютона, что на тело действует сила.

Опыты Лебедева можно рассматривать как экспериментальное доказательство того, что фотоны обладают импульсом.

Хотя световое давление очень мало в обычных условиях, его действие тем не менее может оказаться существенным. Внутри звезд при температуре в несколько десятков миллионов кельвинов давление электромагнитного излучения должно достигать громадных значений. Силы светового давления наряду с гравитационными силами играют значительную роль во внутризвездных процессах.

Давление света согласно электродинамике Максвелла возникает из-за действия силы Лоренца на электроны среды, колеблющиеся под действием электрического поля электромагнитной волны. С точки зрения квантовой теории давление появляется в результате передачи телу импульсов фотонов при их поглощении.

---

§ 92 ХИМИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ СВЕТА. ФОТОГРАФИЯ

Отдельные молекулы поглощают световую энергию порциями — квантами $h\nu$. В случае видимого и ультрафиолетового излучений эта энергия достаточна для расщепления многих молекул. В этом проявляется химическое действие света.

Любое превращение молекул есть химический процесс. Часто после расщепления молекул светом начинается целая цепочка химических превращений. Выцветание тканей на солнце и образование загара — это примеры химического действия света.

Важнейшие химические реакции под действием света происходят в зеленых листьях деревьев и траве, в иглах хвои, во многих микроорганизмах. В зеленом листе под действием Солнца осуществляются процессы, необходимые для жизни на Земле. Они дают нам не только пищу, но и кислород для дыхания.

Листья поглощают из воздуха углекислый газ и расщепляют его молекулы на составные части: углерод и кислород. Происходит это, как установил русский биолог Климент Аркадьевич Тимирязев, в молекулах хлорофилла под действием красных лучей солнечного спектра. Пристраивая

к углеродной цепочке атомы других элементов, извлекаемых корнями из земли, растения строят молекулы белков, жиров и углеводов.

Все это происходит за счет энергии солнечных лучей. Причем здесь особенно важна не только сама энергия, но и та форма, в которой она поступает. Фотосинтез (так называют этот процесс) может протекать только под действием света определенного спектрального состава.

Механизм фотосинтеза еще не выяснен до конца. Когда это произойдет, для человечества, возможно, наступит новая эра. Белки и другие сложные органические вещества можно будет получать на фабриках под голубым небосводом.

Химическое действие света лежит в основе фотографии.

Под действием света происходят химические реакции, определяющие жизнь на Земле.



УПРАЖНЕНИЕ 12

1. Нарисуйте график зависимости кинетической энергии фотоэлектронов от частоты света. Как с помощью такого графика определить постоянную Планка?

2. Определите абсолютный показатель преломления среды, в которой свет с энергией фотона $E = 4{,}4 \cdot 10^{-19}$ Дж имеет длину волны $\lambda = 3{,}0 \cdot 10^{-7}$ м.

3. Определите энергию фотона, соответствующую длине волны $\lambda = 5{,}0 \cdot 10^{-7}$ м.

4. Определите длину волны λ света, которым освещается поверхность металла, если фотоэлектроны имеют кинетическую энергию $W_к = 4{,}5 \cdot 10^{-20}$ Дж, а работа выхода электрона из металла равна $A = 7{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж.

КРАТКИЕ ИТОГИ ГЛАВЫ 11

1. В начале XX в. зародилась квантовая теория — теория движения и взаимодействия элементарных частиц и состоящих из них систем.
2. Для объяснения закономерностей теплового излучения М. Планк предположил, что атомы испускают электромагнитную энергию не непрерывно, а отдельными порциями — квантами. Энергия каждой такой порции определяется формулой
$$E = h\nu,$$
где $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с — постоянная Планка; ν — частота световой волны.

3. Поглощается электромагнитная энергия также отдельными порциями. Это подтверждается явлением фотоэффекта (вырывание электронов из вещества под действием света). Число вырванных электронов пропорционально интенсивности излучения, а кинетическая энергия электронов определяется только частотой света. Согласно представлениям Эйнштейна поглощенная порция энергии $h\nu$ идет на совершение работы выхода A по вырыванию электрона из металла и на сообщение ему кинетической энергии:

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}.$$

Если частота света меньше некоторого ее минимального значения, соответствующего работе выхода $\nu < \nu_{\min} = \frac{A}{h}$, то фотоэффект не наблюдается.

4. При излучении и поглощении свет проявляет корпускулярные свойства. Световая частица называется квантом света или фотоном. Энергия фотона определяется формулой

$$E = h\nu = \hbar\omega,$$

где $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1{,}05 \cdot 10^{-34}$ Дж · с; ω — циклическая частота. Импульс p фотона вычисляется по формуле $p = \frac{h}{\lambda}$.

5. В процессе распространения свет проявляет волновые свойства (явления интерференции и дифракции).

6. Свет обладает дуализмом (двойственностью) свойств. Впоследствии было установлено существование корпускулярно-волнового дуализма у всех элементарных частиц.

7. Фотоэффект широко используется в технике. С помощью специальных приборов — фотоэлементов — энергия света управляет энергией электрического тока или превращается в нее. Фотоэлементы применяются в различных «видящих» автоматах. На явлении фотоэффекта основано устройство солнечных батарей.

8. Согласно теории Максвелла свет оказывает давление на препятствия. Давление это очень мало. Оно было впервые обнаружено и измерено П. Н. Лебедевым.

9. Поглощение света веществом сопровождается химическим действием света. В зеленых листьях растений и во многих микроорганизмах важнейшие химические реакции происходят под действием света. Углекислый газ поглощается из атмосферы листьями и расщепляется на углерод и кислород. В этом заключается процесс фотосинтеза.

Глава 12. АТОМНАЯ ФИЗИКА

Открытие сложного строения атома — важнейший этап становления современной физики, наложивший отпечаток на все ее дальнейшее развитие. В процессе создания количественной теории строения атома, позволившей объяснить атомные спектры, были открыты новые законы движения микрочастиц — законы квантовой механики.

§ 93 СТРОЕНИЕ АТОМА. ОПЫТЫ РЕЗЕРФОРДА

Модель Томсона. Не сразу ученые пришли к правильным представлениям о строении атома. Первая модель атома была предложена английским физиком Дж. Дж. Томсоном, открывшим электрон. По мысли Томсона, положительный заряд атома занимает весь объем атома и распределен в этом объеме с постоянной плотностью. Простейший атом — атом водорода — представляет собой положительно заряженный шар радиусом около 10^{-8} см, внутри которого находится электрон. У более сложных атомов в положительно заряженном шаре находится несколько электронов, так что атом подобен кексу, в котором роль изюминок выполняют электроны.

Однако модель атома Томсона оказалась в полном противоречии с известными уже к тому времени свойствами атома, главным из которых является *устойчивость*.

Опыты Резерфорда. Масса электронов в несколько тысяч раз меньше массы атомов. Так как атом в целом нейтрален, то, следовательно, основная масса атома приходится на его положительно заряженную часть.

Для экспериментального исследования распределения положительного заряда, а значит, и массы внутри атома Эрнест Резерфорд предложил в 1906 г. применить зондирование атома с помощью α-частиц. Эти частицы возникают при распаде радия и некоторых других элементов. Их масса примерно в 8000 раз больше массы электрона, а положительный заряд равен по модулю удвоенному заряду электрона. Это не что иное, как полностью ионизированные атомы гелия. Скорость α-частиц очень велика: она составляет 1/15 скорости света.

Этими частицами Резерфорд бомбардировал атомы тяжелых элементов. Электроны вследствие своей малой массы не могут заметно изменить траекторию α-частицы, подобно тому как камушек в несколько десятков граммов при столкновении с автомобилем не может значительно изменить его скорость.

Резерфорд Эрнест (1871—1937) — великий английский физик, уроженец Новой Зеландии. Своими экспериментальными открытиями заложил основы современного учения о строении атома и радиоактивности. Первым исследовал состав излучения радиоактивных веществ. Открыл атомное ядро и впервые осуществил искусственное превращение атомных ядер. Все поставленные им опыты носили фундаментальный характер, отличались исключительной простотой и ясностью.



Рассеяние (изменение направления движения) α-частиц может вызвать только положительно заряженная часть атома. Таким образом, по рассеянию α-частиц можно определить характер распределения положительного заряда и массы внутри атома. Схема опытов Резерфорда показана на рисунке 12.1.

Радиоактивный препарат, например радий, помещался внутри свинцового цилиндра *1*, вдоль которого был высверлен узкий канал. Пучок α-частиц из канала падал на тонкую фольгу *2* из исследуемого материала (золото, медь и пр.). После рассеяния α-частицы попадали на полупрозрачный экран *3*, покрытый сульфидом цинка. Столкновение каждой частицы с экраном сопровождалось вспышкой света (сцинтилляцией), которую можно было наблюдать в микроскоп *4*. Весь прибор размещался в сосуде, из которого был откачан воздух.

При хорошем вакууме внутри прибора в отсутствие фольги на экране возникал светлый кружок, состоящий из сцинтилляций, вызванных тонким пучком α-частиц. Но когда на пути пучка помещали фольгу, α-частицы из-за рассеяния распределялись на экране по кружку большей площади.

Модифицируя экспериментальную установку, Резерфорд попытался обнаружить отклонение α-частиц на бóльшие углы. Для этого он окружил фольгу сцинтилляциоными экранами и определил число вспышек на каждом экране. Совершенно неожиданно оказалось, что небольшое число α-частиц (примерно одна из двух тысяч) отклонилось на углы, большие 90°. Позднее Резерфорд признался, что, предложив своим ученикам провести эксперимент по наблюдению за рассеянием α-частиц на бóльшие углы, он сам не верил в положительный результат. «Это почти столь же невероятно, — говорил Резерфорд, — как если бы вы вы-

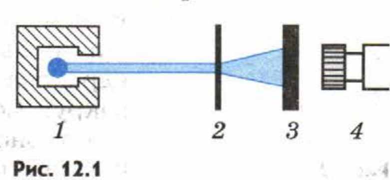


Рис. 12.1

стрелили 15-дюймовым снарядом в кусок тонкой бумаги, а снаряд возвратился бы к вам и нанес вам удар».

В самом деле, предвидеть этот результат на основе модели Томсона было нельзя. При распределении по всему атому положительный заряд не может создать достаточно сильное электрическое поле, способное отбросить α-частицу назад. Максимальная сила отталкивания может быть определена по закону Кулона:

$$F_{\max} = k\frac{q_\alpha q}{R^2}, \qquad (12.1)$$

где q_α — заряд α-частицы; q — положительный заряд атома; R — его радиус; k — коэффициент пропорциональности. Напряженность электрического поля равномерно заряженного шара максимальна на поверхности шара и убывает до нуля по мере приближения к центру. Поэтому чем меньше радиус R, тем больше сила, отталкивающая α-частицы.

Определение размеров атомного ядра. Резерфорд понял, что α-частица могла быть отброшена назад лишь в том случае, если положительный заряд атома и его масса сконцентрированы в очень малой области пространства. Так Резерфорд пришел к мысли о существовании *атомного ядра — тела малых размеров, в котором сконцентрированы почти вся масса и весь положительный заряд атома.*

На рисунке 12.2 показаны траектории α-частиц, пролетающих на различных расстояниях от ядра.

Подсчитывая число α-частиц, рассеянных на различные углы, Резерфорд смог оценить размеры ядра. Оказалось, что ядро имеет диаметр порядка 10^{-12}—10^{-13} см (у разных ядер диаметры различны). Размер же самого атома 10^{-8} см, т. е. в 10—100 тысяч раз превышает размеры ядра. Впоследствии удалось определить и заряд ядра. При условии, что заряд электрона принят за единицу, заряд ядра в точности равен номеру данного химического элемента в периодической системе Д. И. Менделеева.

Планетарная модель атома. На основе своих опытов Резерфорд создал планетарную модель атома. В центре атома расположено положительно заряженное ядро, в котором сосредоточена почти вся масса атома. В целом атом нейтрален. Поэтому число внутриатомных электронов, как и заряд ядра, равно порядковому номеру элемента в периодической системе. Ясно, что покоиться электроны внутри атома не могут, так как они упали бы на ядро. Они движутся вокруг ядра, подобно тому как планеты обращаются вокруг Солнца. Такой характер движения электронов определяется действием кулоновских сил притяжения со стороны ядра.

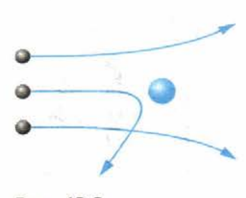


Рис. 12.2

В атоме водорода вокруг ядра обращается всего лишь один электрон. Ядро атома водорода имеет положительный заряд, равный по модулю заряду электрона, и массу, примерно в 1836,1 раза бо́льшую массы электрона. Это ядро было названо **протоном** и стало рассматриваться как элементарная частица. Размер атома водорода — это радиус орбиты его электрона (рис. 12.3).

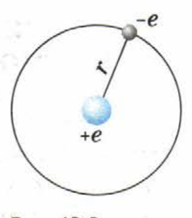


Рис. 12.3

Простая и наглядная планетарная модель атома имеет прямое экспериментальное обоснование. Она кажется совершенно необходимой для объяснения опытов по рассеиванию α-частиц. Но на основе этой модели нельзя объяснить факт существования атома, его устойчивость. Ведь движение электронов по орбитам происходит с ускорением, причем весьма немалым. Ускоренно движущийся заряд по законам электродинамики Максвелла должен излучать электромагнитные волны с частотой, равной частоте его обращения вокруг ядра. Излучение сопровождается потерей энергии. Теряя энергию, электроны должны приближаться к ядру, подобно тому как спутник приближается к Земле при торможении в верхних слоях атмосферы. Как показывают строгие расчеты, основанные на механике Ньютона и электродинамике Максвелла, электрон за ничтожно малое время (порядка 10^{-8} с) должен упасть на ядро. Атом должен прекратить свое существование.

В действительности ничего подобного не происходит. Атомы устойчивы и в невозбужденном состоянии могут существовать неограниченно долго, совершенно не излучая электромагнитные волны.

Не согласующийся с опытом вывод о неизбежной гибели атома вследствие потери энергии на излучение — это результат применения законов классической физики к явлениям, происходящим внутри атома. Отсюда следует, что к таким явлениям законы классической физики неприменимы.

Резерфорд создал планетарную модель атома: электроны обращаются вокруг ядра, подобно тому как планеты обращаются вокруг Солнца. Эта модель проста, обоснована экспериментально, но не позволяет объяснить устойчивость атома.



1. **Почему отрицательно заряженные частицы атома не оказывают заметного влияния на рассеяние α-частиц?**
2. **Почему α-частицы не могли бы рассеиваться на большие углы, если бы положительный заряд атома был распределен по всему его объему?**
3. **Почему планетарная модель атома не согласуется с законами классической физики?**

§ 94 КВАНТОВЫЕ ПОСТУЛАТЫ БОРА. МОДЕЛЬ АТОМА ВОДОРОДА ПО БОРУ

Выход из крайне затруднительного положения в теории атома был найден в 1913 г. датским физиком Нильсом Бором на пути дальнейшего развития квантовых представлений о процессах в природе.

Эйнштейн оценивал проделанную Бором работу «как высшую музыкальность в области мысли», всегда его поражавшую. Основываясь на разрозненных опытных фактах, Бор благодаря гениальной интуиции правильно предугадал путь развития теории атома.

Постулаты Бора. Последовательной теории атома Бор, однако, не разработал. Он в виде постулатов сформулировал основные положения новой теории. Причем и законы классической физики не отвергались им безоговорочно. Новые постулаты, скорее, налагали лишь некоторые ограничения на рассматриваемые классической физикой движения.

Успех теории Бора был тем не менее поразительным, и всем ученым стало ясно, что Бор нашел правильный путь развития теории. Этот путь привел впоследствии к созданию стройной теории движения микрочастиц — квантовой механики.

Первый постулат Бора гласит: ***существуют особые, стационарные состояния атома, находясь в которых атом не излучает энергию, при этом электроны в атоме движутся с укорением. Каждому стационарному состоянию соответствует определенная энергия*** E_n.

Согласно *второму постулату* Бора ***излучение света происходит при переходе атома из стационарного состояния с большей энергией*** E_k ***в стационарное состояние с меньшей энергией*** E_n***. Энергия излученного фотона равна разности энергий стационарных состояний:***

$$h\nu_{kn} = E_k - E_n. \qquad (12.2)$$

Отсюда частоту излучения можно выразить так:

$$\nu_{kn} = \frac{E_k - E_n}{h} = \frac{E_k}{h} - \frac{E_n}{h}. \qquad (12.3)$$

Согласно теории Бора энергия электрона в атоме водорода, находящегося на n-м энергетическом уровне, равна:

$$E_n = -\frac{k^2 m_e e^4}{2\hbar^2}\frac{1}{n^2}.$$

Бор Нильс (1885—1962) — великий датский физик. Создал первую квантовую теорию атома и затем принял самое активное участие в разработке основ квантовой механики. Наряду с этим внес большой вклад в теорию атомного ядра и ядерных реакций. В частности, развил теорию деления атомных ядер, в процессе которого выделяется огромная энергия. В Копенгагене создал большую интернациональную школу физиков и много сделал для развития сотрудничества между физиками всего мира. Активно участвовал в борьбе против атомной угрозы человечеству.



При поглощении света атом переходит из стационарного состояния с меньшей энергией в стационарное состояние с большей энергией.

Второй постулат, также как и первый, противоречит электродинамике Максвелла, так как согласно этому постулату частота излучения света свидетельствует не об особенностях движения электрона, а лишь об изменении энергии атома.

Свои постулаты Бор применил для построения теории простейшей атомной системы — атома водорода. Основная задача состояла в нахождении частот электромагнитных волн, излучаемых водородом. Эти частоты можно найти на основе второго постулата и правила определения стационарных значений энергии атома. Это правило (так называемое правило квантования) Бору опять-таки пришлось постулировать.

Модель атома водорода по Бору. Используя законы механики Ньютона и правило квантования, на основе которого определяются возможные стационарные состояния атома, Бор смог вычислить радиусы орбит электрона и энергии стационарных состояний атома. Минимальный радиус орбиты определяет размеры атома. На рисунке 12.4 значения энергий стационарных состояний (в электронвольтах[1]) отложены на вертикальной оси.

Второй постулат Бора позволяет вычислить по известным значениям энергий стационарных состояний частоты излучений атома водорода.

---

[1] В атомной физике энергию принято выражать в электронвольтах (сокращенно эВ). 1 эВ равен энергии, приобретаемой электроном при прохождении им разности потенциалов 1 В: 1 эВ = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Теория Бора приводит к количественному согласию с экспериментом для значений этих частот. Все частоты излучений атома водорода составляют в своей совокупности ряд серий, каждая из которых образуется при переходах атома в одно из энергетических состояний со всех верхних энергетических состояний (состояний с большей энергией).



Рис. 12.4

Переходы в первое возбужденное состояние (на второй энергетический уровень) с верхних уровней образуют *серию Бальмера*. На рисунке 12.4 эти переходы изображены стрелками. Красная, зеленая и две синие линии в видимой части спектра водорода (см. рис. V, *3* на цветной вклейке) соответствуют переходам

$$E_3 \to E_2,\ E_4 \to E_2,\ E_5 \to E_2,\ E_6 \to E_2.$$

Данная серия названа по имени швейцарского учителя И. Бальмера, который еще в 1885 г. на основе экспериментальных данных получил простую формулу для определения частот видимой части спектра водорода.

Поглощение света. Поглощение света — процесс, обратный излучению. Атом, поглощая свет, переходит из низших энергетических состояний в высшие. При этом он поглощает излучение той же самой частоты, которую излучает, переходя из высших энергетических состояний в низшие.

На основе двух постулатов и правила квантования Бор определил радиус атома водорода и энергии стационарных состояний атома. Это позволило вычислить частоты излучаемых и поглощаемых атомом электромагнитных волн.



1. **В чем заключаются противоречия между постулатами Бора и законами классической механики и классической электродинамики?**
2. **Какое излучение наблюдается при переходах электрона в атоме водорода на второй энергетический уровень?**

§ 95 ТРУДНОСТИ ТЕОРИИ БОРА. КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА

Наибольший успех теория Бора имела в применении к атому водорода, для которого оказалось возможным построить количественную теорию спектра.

Однако разработать количественную теорию для следующего за водородом атома гелия на основе боровских представлений не удалось. Относительно атома гелия и более сложных атомов теория Бора позволяла делать лишь качественные (хотя и очень важные) заключения.

Это и неудивительно. Ведь теория Бора является половинчатой, внутренне противоречивой. С одной стороны, при разработке теории атома водорода использовались привычные законы механики Ньютона и давно известный закон Кулона, а с другой — вводились квантовые постулаты, никак не связанные с механикой Ньютона и электродинамикой Максвелла. Введение в физику квантовых представлений требовало радикальной переработки как механики, так и электродинамики. Эта переработка была осуществлена в начале второй четверти XX в., когда были созданы новые физические теории: квантовая механика и квантовая электродинамика.

Постулаты Бора оказались совершенно правильными. Но они рассматривались уже не как постулаты, а как следствия основных принципов этих теорий. Правило же квантования Бора, как выяснилось, применимо далеко не всегда.

Представление об определенных орбитах, по которым движется электрон в атоме Бора, оказалось весьма условным. На самом деле движение электрона в атоме имеет очень мало общего с движением планет по орбитам. Если бы атом водорода в наинизшем его энергетическом состоянии можно было сфотографировать с большой выдержкой, то мы увидели бы облако с переменной плотностью. Бóльшую часть времени электрон находится на определенном расстоянии от ядра. Это расстояние можно принять за грубое подобие радиуса орбиты. Фотография атома совсем не походила бы на привычный рисунок Солнечной системы, а скорее напоминала бы расплывчатое пятно, полученное при фотографировании бабочки, порхающей около фонаря.

В настоящее время с помощью квантовой механики можно ответить практически на любой вопрос, относящийся к строению и свойствам электронных оболочек атомов. Но количественная теория оказывается весьма сложной, и мы ее рассматривать не будем. С качественным описанием электронных оболочек атомов вы познакомились в курсе химии.

§ 96 ЛАЗЕРЫ[1]

На вопрос о том, что такое *лазер*, академик Н. Г. Басов отвечал так: «Лазер — это устройство, в котором энергия, например тепловая, химическая, электрическая, преобразуется в энергию электромагнитного поля — лазерный луч. При таком преобразовании часть энергии неизбежно теряется, но важно то, что полученная в результате лазерная энергия обладает более высоким качеством. Качество лазерной энергии определяется ее высокой концентрацией и возможностью передачи на значительное расстояние. Лазерный луч можно сфокусировать в крохотное пятнышко диаметром порядка длины световой волны и получить плотность энергии, превышающую уже на сегодняшний день плотность энергии ядерного взрыва. С помощью лазерного излучения уже удалось достичь самых высоких значений температуры, давления, магнитной индукции. Наконец, лазерный луч является самым емким носителем информации и в этой роли — принципиально новым средством ее передачи и обработки».

Индуцированное излучение. В 1917 г. Эйнштейн предсказал возможность так называемого *индуцированного* (вынужденного) излучения света атомами. Под **индуцированным излучением** понимается излучение возбужденных атомов под действием падающего на них света. Характерной особенностью этого излучения является то, что возникшая при индуцированном излучении световая волна не отличается от волны, падающей на атом, ни частотой, ни фазой, ни поляризацией; таким образом, падающая и излученная волны являются когерентными.

На языке квантовой теории вынужденное излучение означает переход атома из высшего энергетического состояния в низшее, но не самопроизвольный, как при обычном излучении, а переход под влиянием внешнего воздействия.

Лазеры. Еще в 1940 г. советский физик В. А. Фабрикант указал на возможность использования явления вынужденного излучения для усиления электромагнитных волн. В 1954 г. советские ученые Н. Г. Басов и А. М. Прохоров и независимо от них американский физик Ч. Таунс использовали явление индуцированного излучения для создания микроволнового генератора радиоволн с длиной волны $\lambda = 1{,}27$ см. За разработку нового принципа генерации и усиления радиоволн Н. Г. Басову и А. М. Прохоро-

[1] Слово *лазер* образовано сочетанием первых букв слов английского выражения «Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation» («усиление света при помощи индуцированного излучения»).

ву в 1959 г. была присуждена Ленинская премия. В 1963 г. Н. Г. Басов, А. М. Прохоров и Ч. Таунс были удостоены Нобелевской премии.

В 1960 г. в США был создан первый лазер — квантовый генератор электромагнитных волн в видимом диапазоне спектра.

Свойства лазерного излучения. Лазерные источники света обладают рядом существенных преимуществ по сравнению с другими источниками света.

1. Лазеры способны создавать пучки света с очень малым углом расхождения (около 10^{-5} рад). На Луне такой пучок, испущенный с Земли, дает пятно диаметром 3 км.

2. Свет лазера обладает исключительной монохроматичностью. В отличие от обычных источников света, атомы которых излучают свет независимо друг от друга, в лазерах атомы излучают свет согласованно. Поэтому фаза волны не испытывает нерегулярных изменений.

3. Лазеры являются самыми мощными источниками света. В узком интервале спектра кратковременно (в течение промежутка времени продолжительностью порядка 10^{-13} с) у некоторых типов лазеров достигается мощность излучения 10^{17} Вт/см^2, в то время как мощность излучения Солнца равна только $7 \cdot 10^3$ Вт/см^2, причем суммарно по всему спектру. На узкий же интервал $\Delta\lambda = 10^{-6}$ см (ширина спектральной линии лазера) приходится у Солнца всего 0,2 Вт/см^2. Напряженность электрического поля в электромагнитной волне, излучаемой лазером, превышает напряженность поля внутри атома.

Принцип действия лазеров. В обычных условиях большинство атомов находится в низшем энергетическом состоянии. Поэтому при низких температурах вещества не светятся.

При прохождении электромагнитной волны сквозь вещество ее энергия поглощается. За счет поглощенной энергии волны часть атомов возбуждается, т. е. переходит в более высокое энергетическое состояние. При этом у светового пучка отнимается энергия, равная разности энергий между уровнями *2* и *1*:

$$h\nu = E_2 - E_1.$$

На рисунке 12.5, *а* схематически представлены невозбужденный атом и электромагнитная волна в виде отрезка синусоиды. Электрон находится на нижнем уровне. На рисунке 12.5, *б* изображен возбужденный атом, поглотивший энергию. Возбужденный атом может отдать свою энергию соседним атомам при столкновении или испустить фотон.

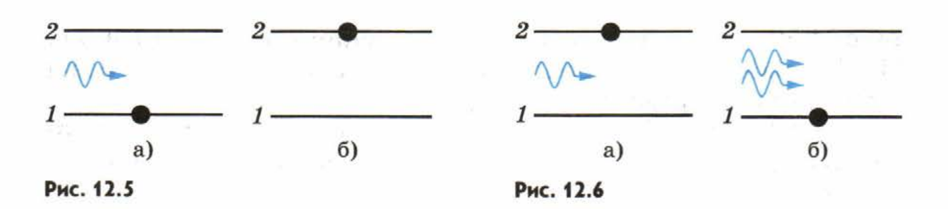


Рис. 12.5 **Рис. 12.6**

Теперь представим себе, что каким-либо способом мы возбудили бóльшую часть атомов среды. Тогда при прохождении через вещество электромагнитной волны с частотой

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

эта волна будет не ослабляться, а, напротив, усиливаться за счет индуцированного излучения. Под ее воздействием атомы согласованно переходят в низшие энергетические состояния, излучая волны, совпадающие по частоте и фазе с падающей волной. На рисунке 12.6, *а* изображены возбужденный атом и волна, а на рисунке 12.6, *б* схематически показано, что атом перешел в основное состояние, а волна усилилась.

Трехуровневая система. Существуют различные методы получения среды с возбужденными состояниями атомов. В рубиновом лазере для этого используется специальная мощная лампа. Атомы возбуждаются за счет поглощения света.

Но двух уровней энергии для работы лазера недостаточно. Каким бы мощным ни был свет лампы, число возбужденных атомов не будет больше числа невозбужденных. Ведь свет одновременно и возбуждает атомы, и вызывает в них индуцированные переходы с верхнего уровня на нижний.

Выход был найден в использовании трех энергетических уровней (общее число уровней всегда велико, но речь идет о «работающих» уровнях). На рисунке 12.7 изображены три энергетических уровня. Существенно, что в отсутствие внешнего воздействия время, в течение которого атомная система находится в различных энергетических состояниях («время жизни»), неодинаково. На уровне *3* система «живет» очень мало, порядка 10^{-8} с, после чего самопроизвольно переходит в состояние *2* без излучения света. (Энергия при этом передается кристаллической решетке.) «Время жизни» в со-

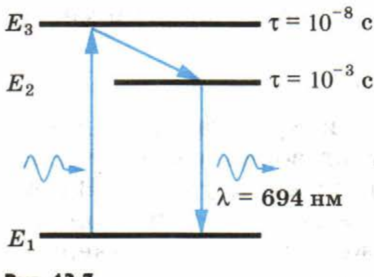


Рис. 12.7

стоянии *2* в 100 000 раз больше, т. е. составляет около 10^{-3} с. Переход из состояния *2* в состояние *1* под действием внешней электромагнитной волны сопровождается излучением. Это используется в лазерах. После вспышки мощной лампы система переходит в состояние *3* и спустя промежуток времени около 10^{-8} с оказывается в состоянии *2*, в котором «живет» сравнительно долго. Таким образом и создается «перенаселенность» возбужденного уровня *2* по сравнению с невозбужденным уровнем *1*.

Необходимые энергетические уровни имеются в кристаллах рубина. Рубин — это красный кристалл оксида алюминия Al_2O_3 с примесью атомов хрома (около 0,05%). Именно уровни ионов хрома в кристалле обладают требуемыми свойствами.

Устройство рубинового лазера. Из кристалла рубина изготовляют стержень с плоскопараллельными торцами. Газоразрядная лампа, имеющая форму спирали (рис. 12.8), дает сине-зеленый свет. Кратковременный импульс тока от батареи конденсаторов емкостью в несколько тысяч микрофарад вызывает яркую вспышку лампы. Спустя малое время энергетический уровень *2* становится «перенаселенным». В результате самопроизвольных переходов $2 \to 1$ начинают излучаться волны всевозможных направлений. Те из них, которые идут под углом к оси кристалла, выходят из него и не играют в дальнейших процессах никакой роли. Но волна, идущая вдоль оси кристалла, многократно отражается от его торцов. Она вызывает индуцированное излучение возбужденных ионов хрома и быстро усиливается.

Один из торцов рубинового стержня делают зеркальным, а другой — полупрозрачным. Через полупрозрачный торец выходит мощный кратковременный (длительностью около сотни микросекунд) импульс красного света, обладающий теми феноменальными свойствами, о которых было рассказано в начале параграфа.

Волна является когерентной, так как все атомы излучают согласованно, и очень мощной, так как при индуцированном излучении вся запасенная энергия выделяется за очень малое время.

Другие типы лазеров. Рубиновый лазер, с которым мы ознакомились, работает в импульсном режиме. Существуют также лазеры непрерывного действия.

В газовых лазерах этого типа рабочим веществом является газ. Атомы рабочего вещества возбуждаются электрическим разрядом.

Рис. 12.8

Применяются и полупроводниковые лазеры непрерывного действия. Они созданы впервые в нашей стране. В них энергия для излучения заимствуется от электрического тока.

Созданы очень мощные газодинамические лазеры непрерывного действия на сотни киловатт. В этих лазерах «перенаселенность» верхних энергетических уровней возникает при расширении и адиабатном охлаждении сверхзвуковых газовых потоков, нагретых до нескольких тысяч кельвинов.

Применение лазеров. Очень перспективно применение лазерного луча для связи, особенно в космическом пространстве, где нет поглощающих свет облаков. Лазеры используются для записи и хранения информации (лазерные диски). Огромная мощность лазерного луча используется для испарения различных материалов в вакууме, для сварки и т. д. С помощью луча лазера проводят хирургические операции: например, «приваривают» отслоившуюся от глазного дна сетчатку; помогают человеку получать объемные изображения предметов, используя когерентность лазерного луча.

Лазеры позволили создать светолокатор, с помощью которого расстояния до предметов измеряются с точностью до нескольких миллиметров. Такая точность недоступна для радиолокаторов.

Возбуждая лазерным излучением атомы или молекулы, можно вызвать между ними химические реакции, которые в обычных условиях не идут.

Перспективным может быть использование мощных лазерных лучей для осуществления управляемой термоядерной реакции.

В настоящее время лазеры настолько широко используются, что перечислить все области их применения не представляется возможным.

Создание лазеров — пример того, как развитие фундаментальной науки (квантовой теории) приводит к гигантскому прогрессу в самых различных областях техники и технологии.



1. Чем отличается излучение лазера от излучения лампы накаливания?
2. Перечислите основные применения лазеров.



УПРАЖНЕНИЕ 13

1. Определите скорость v и ускорение a электрона на первой боровской орбите, радиус которой определяется формулой $r_0 = \frac{\hbar^2}{kme^2}$, где m и e — масса и заряд электрона; $k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$.

2. Определите длину волны света, испускаемого атомом водорода при его переходе из стационарного состояния с энергией $E_4 = -0{,}85$ эВ ($k = 4$) в состояние с энергией $E_2 = -3{,}4$ эВ ($n = 2$).

КРАТКИЕ ИТОГИ ГЛАВЫ 12

1. Резерфорд, исследуя рассеяние α-частиц веществом, установил существование атомного ядра. Положительный заряд и почти вся масса атома сосредоточены в атомном ядре, размер которого составляет 10^{-12}— 10^{-13} см. (Это в 10—100 тысяч раз меньше размера атома.) Заряд атомного ядра равен порядковому номеру элемента в периодической системе элементов Д. И. Менделеева, умноженному на модуль заряда электрона. Ядром атома водорода является протон.
2. На основе своих опытов Резерфорд предложил планетарную модель атома. Электроны в этой модели обращаются вокруг ядра, подобно тому как планеты обращаются вокруг Солнца. Однако такой атом согласно законам классической физики не может быть устойчивым. Электроны должны излучать, теряя энергию, и падать на ядро. В действительности же все атомы устойчивы.
3. Выход из этих противоречий был найден Бором на пути дальнейшего развития квантовой теории. Основу теории Бора составляют два постулата.
   Первый постулат Бора гласит: атомная система может находиться только в особых, стационарных, или квантовых, состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия $E_п$; в стационарном состоянии атом не излучает.
   Согласно второму постулату Бора излучение или поглощение света происходит при переходе атома из одного стационарного состояния в другое. Энергия излученного или поглощенного фотона равна разности энергий стационарных состояний:
   $$h\nu_{kn} = E_k - E_n.$$
   При излучении фотона $k > n$, при поглощении $k < n$.
4. Теория Бора дала правильные значения для всех частот линейчатого спектра излучения водорода. Кроме того, она позволила теоретически вычислить радиус атома водорода.
   Однако теория Бора не была логически последовательной. На ее основе не удалось разработать количественную теорию более сложных атомов (атома гелия и др.).

Введение квантовых представлений требовало радикального пересмотра механики и электродинамики, что и было осуществлено в 20-х гг. XX столетия. Была создана квантовая механика и квантовая электродинамика.

5. На основе квантовой теории излучения были построены квантовые генераторы радиоволн и квантовые генераторы видимого света — лазеры. Лазеры создают когерентное излучение очень большой мощности.
   Излучение лазеров очень широко применяется в различных областях науки и техники.

Глава 13. ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА

Выражения *атомное ядро* и *элементарные частицы* уже неоднократно упоминались. Вы знаете, что атом состоит из ядра и электронов. Само атомное ядро состоит из элементарных частиц, нейтронов и протонов. Раздел физики, в котором исследуется строение и превращение атомных ядер, называется ядерной физикой.

Первоначально разделения на ядерную физику и физику элементарных частиц не было. С многообразием мира элементарных частиц физики столкнулись при изучении ядерных процессов. Выделение физики элементарных частиц в самостоятельную область исследования произошло около 1950 г. Сегодня существуют два самостоятельных раздела физики: содержание одного из них составляет изучение атомных ядер, а содержание другого — изучение природы, свойств и взаимных превращений элементарных частиц.

§ 97 МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЯ И РЕГИСТРАЦИИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Вначале ознакомимся с устройствами, благодаря которым возникла и начала развиваться физика атомного ядра и элементарных частиц. Это устройства для регистрации и изучения столкновений и взаимных превращений ядер и элементарных частиц. Именно они дают людям необходимую информацию о микромире.

Принцип действия приборов для регистрации элементарных частиц. Любое устройство, регистрирующее элементарные частицы или движущиеся атомные ядра, подобно заряженному ружью с взведенным курком. Небольшое уси-

лие при нажатии на спусковой крючок ружья вызывает эффект, не сравнимый с затраченным усилием, — выстрел.

Регистрирующий прибор — это более или менее сложная макроскопическая система, которая может находиться в неустойчивом состоянии. При небольшом возмущении, вызванном пролетевшей частицей, начинается процесс перехода системы в новое, более устойчивое состояние. Этот процесс и позволяет регистрировать частицу. В настоящее время используется множество различных методов регистрации частиц.

В зависимости от целей эксперимента и условий, в которых он проводится, применяются те или иные регистрирующие устройства, отличающиеся друг от друга по основным характеристикам.

Газоразрядный счетчик Гейгера. Счетчик Гейгера — один из важнейших приборов для автоматического подсчета частиц.

Счетчик (рис. 13.1) состоит из стеклянной трубки, покрытой изнутри металлическим слоем (катод), и тонкой металлической нити, идущей вдоль оси трубки (анод). Трубка заполняется газом, обычно аргоном. Действие счетчика основано на ударной ионизации. Заряженная частица (электрон, α-частица и т. д.), пролетая в газе, отрывает от атомов электроны и создает положительные ионы и свободные электроны. Электрическое поле между анодом и катодом (к ним подводится высокое напряжение) ускоряет электроны до энергий, при которых начинается ударная ионизация. Возникает лавина ионов, и ток через счетчик резко возрастает. При этом на нагрузочном резисторе R образуется импульс напряжения, который подается в регистрирующее устройство.

Для того чтобы счетчик мог регистрировать следующую попавшую в него частицу, лавинный разряд необходимо погасить. Это происходит автоматически. Так как в момент появления импульса тока падение напряжения на нагрузочном резисторе R велико, то напряжение между анодом и катодом резко уменьшается — настолько, что разряд прекращается.

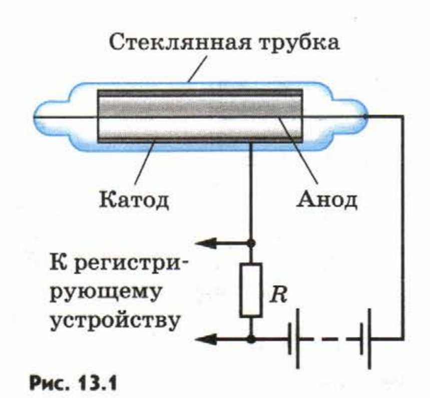


Рис. 13.1

Счетчик Гейгера применяется в основном для регистрации электронов и γ-квантов (фотонов большой энергии).

В настоящее время созданы счетчики, работающие на иных принципах.

Камера Вильсона. Счетчики позволяют лишь регистрировать факт прохождения через них частицы и фиксировать некоторые ее характеристики. В камере же Вильсона, созданной в 1912 г., быстрая заряженная частица оставляет след, который можно наблюдать непосредственно или сфотографировать. Этот прибор можно назвать окном в микромир, т. е. мир элементарных частиц и состоящих из них систем.

Принцип действия камеры Вильсона основан на конденсации перенасыщенного пара на ионах с образованием капелек воды. Эти ионы создает вдоль своей траектории движущаяся заряженная частица.

Камера Вильсона представляет собой герметически закрытый сосуд, заполненный парами воды или спирта, близкими к насыщению (рис. 13.2). При резком опускании поршня, вызванном уменьшением давления под ним, пар в камере адиабатно расширяется. Вследствие этого происходит охлаждение, и пар становится перенасыщенным. Это — неустойчивое состояние пара: он легко конденсируется, если в сосуде появляются центры конденсации. Центрами конденсации становятся ионы, которые образует в рабочем пространстве камеры пролетевшая частица. Если частица проникает в камеру сразу после расширения пара, то на ее пути появляются капельки воды. Эти капельки образуют видимый след пролетевшей частицы — **трек** (рис. 13.3). Затем камера возвращается в исходное состояние, и ионы удаляются электрическим полем. В зависимости от размеров камеры время восстановления рабочего режима варьируется от нескольких секунд до десятков минут.

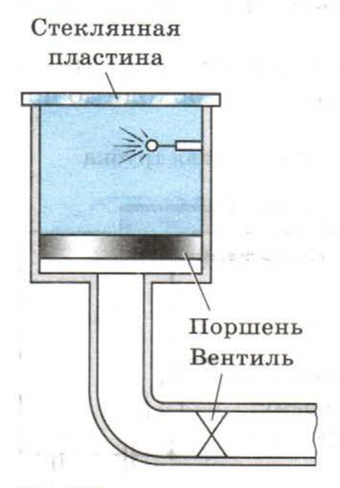


Рис. 13.2

Информация, которую дают треки в камере Вильсона, значительно богаче той, которую могут дать счетчики. По длине трека можно определить энергию частицы, а по числу капелек на единицу длины трека — ее скорость. Чем длиннее трек частицы, тем больше ее энергия. А чем больше капелек воды образуется на единицу длины трека, тем меньше ее скорость. Частицы с большим зарядом оставляют трек большей толщины.

Советские физики П. Л. Капица и Д. В. Скобельцын предложили помещать камеру Вильсона в одно-

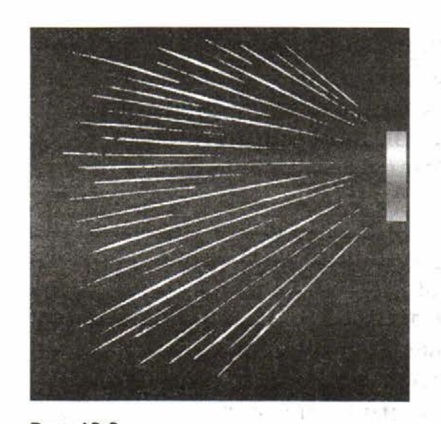


Рис. 13.3

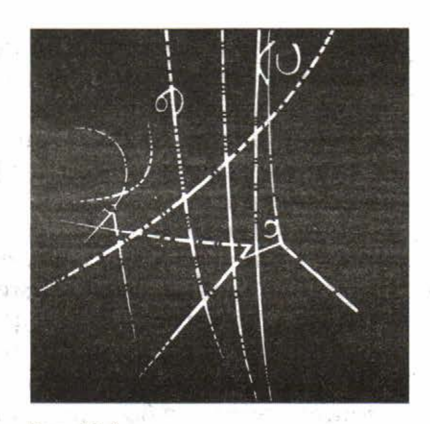


Рис. 13.4

родное магнитное поле. Магнитное поле действует на движущуюся заряженную частицу с определенной силой (силой Лоренца). Эта сила искривляет траекторию частицы, не изменяя модуля ее скорости. Трек имеет тем большую кривизну, чем больше заряд частицы и чем меньше ее масса. По кривизне трека можно определить отношение заряда частицы к ее массе. Если известна одна из этих величин, то можно вычислить другую. Например, по заряду частицы и кривизне ее трека можно найти массу частицы.

Пузырьковая камера. В 1952 г. американским ученым Д. Глейзером было предложено использовать для обнаружения треков частиц перегретую жидкость. В такой жидкости на ионах (центрах парообразования), образующихся при движении быстрой заряженной частицы, появляются пузырьки пара, дающие видимый трек. Камеры данного типа были названы *пузырьковыми*.

В исходном состоянии жидкость в камере находится под высоким давлением, предохраняющим ее от закипания, несмотря на то, что температура жидкости несколько выше температуры кипения при атмосферном давлении. При резком понижении давления жидкость оказывается перегретой, и в течение небольшого времени она будет находиться в неустойчивом состоянии. Заряженные частицы, пролетающие именно в это время, вызывают появление треков, состоящих из пузырьков пара (рис. 13.4). В качестве жидкости используются главным образом жидкий водород и пропан. Длительность рабочего цикла пузырьковой камеры невелика — около 0,1 с.

Преимущество пузырьковой камеры перед камерой Вильсона обусловлено большей плотностью рабочего вещества. Пробеги частиц вследствие этого оказываются достаточно

короткими, и частицы даже больших энергий застревают в камере. Это позволяет наблюдать серию последовательных превращений частицы и вызываемые ею реакции.

Треки в камере Вильсона и пузырьковой камере — один из главных источников информации о поведении и свойствах частиц.

Наблюдение следов элементарных частиц производит сильное впечатление, создает ощущение непосредственного соприкосновения с микромиром.

Метод толстослойных фотоэмульсий. Для регистрации частиц наряду с камерами Вильсона и пузырьковыми камерами применяются толстослойные фотоэмульсии. Ионизирующее действие быстрых заряженных частиц на эмульсию фотопластинки позволило французскому физику А. Беккерелю открыть в 1896 г. радиоактивность. Метод фотоэмульсии был развит советскими физиками Л. В. Мысовским, Г. Б. Ждановым и др.

Фотоэмульсия содержит большое количество микроскопических кристалликов бромида серебра. Быстрая заряженная частица, пронизывая кристаллик, отрывает электроны от отдельных атомов брома. Цепочка таких кристалликов образует скрытое изображение. При проявлении в этих кристалликах восстанавливается металлическое серебро и цепочка зерен серебра образует трек частицы (рис. 13.5). По длине и толщине трека можно оценить энергию и массу частицы.

Из-за большой плотности фотоэмульсии треки получаются очень короткими (порядка 10^{-3} см для α-частиц, испускаемых радиоактивными элементами), но при фотографировании их можно увеличить.

Преимущество фотоэмульсий в том, что время экспозиции может быть сколь угодно большим. Это позволяет регистрировать редкие явления. Важно и то, что благодаря большой тормозящей способности фотоэмульсий увеличивается число наблюдаемых интересных реакций между частицами и ядрами.

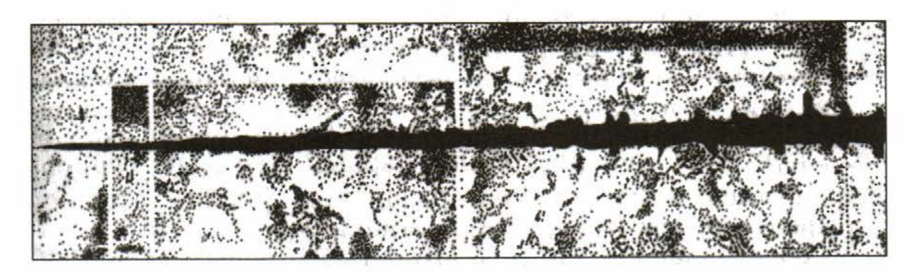


Рис. 13.5

Мы рассказали далеко не о всех приборах, регистрирующих элементарные частицы. Современные приборы для обнаружения редко встречающихся и короткоживущих частиц очень сложны. В их создании принимают участие сотни людей.



1. **Можно ли с помощью камеры Вильсона регистрировать незаряженные частицы?**
2. **Какие преимущества имеет пузырьковая камера по сравнению с камерой Вильсона?**

§ 98 ОТКРЫТИЕ РАДИОАКТИВНОСТИ

Нестабильность атомов была открыта в конце XIX в. Спустя полвека построили первый ядерный реактор.

Открытие *радиоактивности* — явления, доказывающего сложный состав атомного ядра, — произошло благодаря счастливой случайности. Рентгеновские лучи, как вы помните, впервые были получены при столкновениях быстрых электронов со стеклянной стенкой разрядной трубки. Одновременно наблюдалось свечение стенок трубки. Беккерель долгое время исследовал подобное явление — свечение веществ, облученных солнечным светом. К таким веществам относятся, в частности, соли урана, с которыми экспериментировал ученый.

И вот у него возник вопрос: не появляются ли после облучения солей урана наряду с видимым светом и рентгеновские лучи? Беккерель завернул фотопластинку в плотную черную бумагу, положил сверху крупинки урановой соли и выставил на яркий солнечный свет. После проявления фотопластинка почернела на тех участках, где лежала соль. Следовательно, уран создавал какое-то излучение, которое, подобно рентгеновскому, пронизывает непрозрачные тела и действует на фотопластинку. Беккерель думал, что это излучение возникает под влиянием солнечных лучей.

Но однажды, в феврале 1896 г., провести очередной опыт ему не удалось из-за облачной погоды. Беккерель убрал пластинку в ящик стола, положив на нее сверху медный крест, покрытый солью урана. Проявив на всякий случай фотопластинку два дня спустя, он обнаружил на ней почернение в форме отчетливой тени креста. Это означало, что *соли урана самопроизвольно, без каких-либо внешних влияний, создают какое-то излучение*. Начались интенсивные исследования. Конечно, не будь этой



Склодовская-Кюри Мария (1867—1934) — физик и химик. Родилась в Польше, в семье учителя, работала во Франции. Первая женщина-профессор Парижского университета. Совместно с мужем П. Кюри открыла новые радиоактивные элементы **полоний** и **радий** и исследовала их свойства. Разработала классический метод обработки и анализа урановых руд, на протяжении ряда лет исследовала свойства радиоактивных излучений, их действие на живые клетки и т. д. Дважды получала Нобелевскую премию по физике и химии.

счастливой случайности, радиоактивные явления все равно были бы открыты, но, возможно, значительно позже.

Вскоре Беккерель обнаружил, что излучение урановых солей ионизирует воздух, подобно рентгеновским лучам, и разряжает электроскоп. Испробовав различные химические соединения урана, он установил очень важный факт: интенсивность излучения определяется только количеством урана в препарате и совершенно не зависит от того, в какие соединения он входит. Следовательно, это свойство присуще не соединениям, а химическому элементу урану, его атомам.

Естественно было попытаться обнаружить, не обладают ли способностью к самопроизвольному излучению другие химические элементы, кроме урана. В 1898 г. Мария Склодовская-Кюри во Франции и другие ученые открыли излучение *тория*. В дальнейшем главные усилия в поисках новых элементов были предприняты Марией Склодовской-Кюри и ее мужем Пьером Кюри. Систематическое исследование руд, содержащих уран и торий, позволило им выделить новый, неизвестный ранее химический элемент — *полоний*, названный так в честь родины Марии Склодовской-Кюри — Польши.

Наконец, был открыт еще один элемент, дающий очень интенсивное излучение. Его назвали *радием* (т. е. лучистым). Само же явление самопроизвольного излучения было названо супругами Кюри **радиоактивностью.**

Радий имеет относительную атомную массу, равную 226, и занимает в таблице Д. И. Менделеева клетку под номером 88. До открытия Кюри эта клетка пустовала. По своим химическим свойствам радий принадлежит к щелочно-земельным элементам.

Впоследствии было установлено, что все химические элементы с порядковым номером более 83 являются радиоактивными.

Радиоактивностью называется способность нестабильных ядер превращаться в другие ядра, при этом процесс превращения сопровождается испусканием различных частиц.

В конце XIX в. была открыта радиоактивность. Ряд химических элементов самопроизвольно создает различные излучения.

§ 99 АЛЬФА-, БЕТА- И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

После открытия радиоактивных элементов началось исследование физической природы их излучения. Кроме Беккереля и супругов Кюри, этим занялся Резерфорд.

Классический опыт, позволивший обнаружить сложный состав радиоактивного излучения, состоял в следующем. Препарат радия помещали на дно узкого канала в куске свинца. Против канала находилась фотопластинка. На выходившее из канала излучение действовало сильное магнитное поле, линии индукции которого перпендикулярны лучу (рис. 13.6). Вся установка размещалась в вакууме.

В отсутствие магнитного поля на фотопластинке после проявления обнаруживалось одно темное пятно точно напротив канала. В магнитном поле пучок распадался на три пучка. Две составляющие первичного потока отклонялись в противоположные стороны. Это указывало на наличие у этих излучений электрических зарядов противоположных знаков. При этом отрицательный компонент излучения отклонялся магнитным полем гораздо сильнее, чем положительный. Третья составляющая совсем не отклонялась магнитным полем. Положительно заряженный компонент получил название альфа-лучей, отрицательно заряженный — бета-лучей и нейтральный — гамма-лучей (α-лучи, β-лучи, γ-лучи).

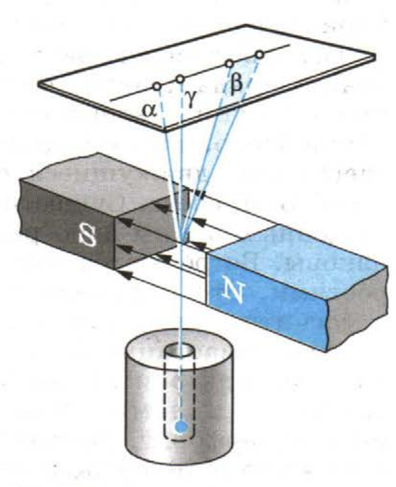


Рис. 13.6

Эти три вида излучения очень сильно различаются по проникающей способности, т. е. по тому, насколько интенсивно они поглощаются различными веществами. Наименьшей про-

никающей способностью обладают α-лучи. Слой бумаги толщиной около 0,1 мм для них уже непрозрачен. Если прикрыть отверстие в свинцовой пластинке листочком бумаги, то на фотопластинке не обнаружится пятна, соответствующего α-излучению.

Гораздо меньше поглощаются при прохождении через вещество β-лучи. Алюминиевая пластинка полностью их задерживает только при толщине в несколько миллиметров. Наибольшей проникающей способностью обладают γ-лучи.

Интенсивность поглощения γ-лучей усиливается с увеличением атомного номера вещества-поглотителя. Но и слой свинца толщиной в 1 см не является для них непреодолимой преградой. При прохождении γ-лучей через такой слой свинца их интенсивность ослабевает лишь вдвое.

Физическая природа α-, β- и γ-лучей, очевидно, различна.

Гамма-лучи. По своим свойствам γ-лучи очень сильно напоминают рентгеновские, но только их проникающая способность гораздо больше, чем у рентгеновских лучей. Это наводило на мысль, что γ-лучи представляют собой электромагнитные волны. Все сомнения в этом отпали после того, как была обнаружена дифракция γ-лучей на кристаллах и измерена их длина волны. Она оказалась очень малой — от 10^{-8} до 10^{-11} см.

На шкале электромагнитных волн γ-лучи непосредственно следуют за рентгеновскими. Скорость распространения у γ-лучей такая же, как у всех электромагнитных волн, — около 300 000 км/с.

Бета-лучи. С самого начала α- и β-лучи рассматривались как потоки заряженных частиц. Проще всего было экспериментировать с β-лучами, так как они сильнее отклоняются как в магнитном, так и в электрическом поле.

Основная задача экспериментаторов состояла в определении заряда и массы частиц. При исследовании отклонения β-частиц в электрических и магнитных полях было установлено, что они представляют собой не что иное, как электроны, движущиеся со скоростями, очень близкими к скорости света. Существенно, что скорости β-частиц, испущенных каким-либо радиоактивным элементом, неодинаковы. Встречаются частицы с самыми различными скоростями. Это и приводит к расширению пучка β-частиц в магнитном поле (см. рис. 13.6).

Альфа-частицы. Труднее было выяснить природу α-частиц, так как они слабее отклоняются магнитным и электрическим полями. Окончательно эту задачу удалось решить Резерфорду. Он измерил отношение заряда q частицы к ее массе m по отклонению в магнитном поле. Оно оказалось примерно в 2 раза меньше, чем у протона — ядра ато-

ма водорода. Заряд протона равен элементарному, а его масса очень близка к атомной единице массы[1]. Следовательно, у α-частицы на один элементарный заряд приходится масса, равная двум атомным единицам массы.

Но заряд α-частицы и ее масса оставались, тем не менее, неизвестными. Следовало измерить либо заряд, либо массу α-частицы. С появлением счетчика Гейгера стало возможным проще и точнее измерить заряд. Сквозь очень тонкое окошко α-частицы могут проникать внутрь счетчика и регистрироваться им.

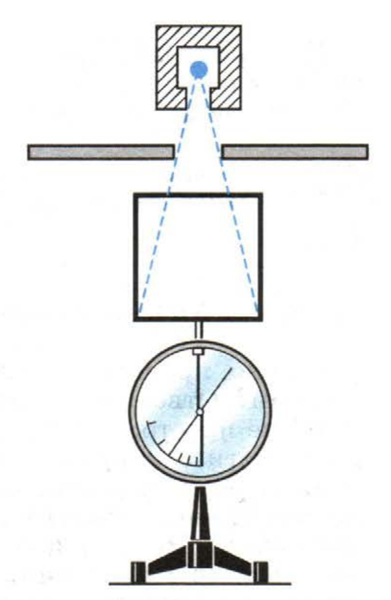


Рис. 13.7

Резерфорд поместил на пути α-частиц счетчик Гейгера, который измерял число частиц, испускавшихся радиоактивным препаратом за определенное время. Затем он поставил на место счетчика металлический цилиндр, соединенный с чувствительным электрометром (рис. 13.7). Электрометром Резерфорд измерял заряд α-частиц, испущенных источником внутрь цилиндра за такое же время (радиоактивность многих веществ почти не меняется со временем). Зная суммарный заряд α-частиц и их число, Резерфорд определил отношение этих величин, т. е. заряд одной α-частицы. Этот заряд оказался равным двум элементарным.

Таким образом, он установил, что у α-частицы на каждый из двух элементарных зарядов приходится две атомные единицы массы. Следовательно, на два элементарных заряда приходится четыре атомные единицы массы. Такой же заряд и такую же относительную атомную массу имеет ядро гелия. Из этого следует, что α-частица — это ядро атома гелия.

Не довольствуясь достигнутым результатом, Резерфорд затем еще прямыми опытами доказал, что при радиоактивном α-распаде образуется именно гелий. Собирая α-частицы внутри специального резервуара на протяжении нескольких дней, он с помощью спектрального анализа убедился в том, что в сосуде накапливается гелий (каждая α-частица захватывала два электрона и превращалась в атом гелия).

[1] Атомная единица массы (а. е. м.) равна 1/12 массы атома углерода; 1 а. е. м. $\approx 1{,}66057 \cdot 10^{-27}$ кг.

При радиоактивном распаде возникают α-лучи (ядра атома гелия), β-лучи (электроны) и γ-лучи (коротковолновое электромагнитное излучение).



Почему выяснить природу α-лучей оказалось гораздо сложнее, чем в случае β-лучей?

§ 100 РАДИОАКТИВНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ

Что же происходит с веществом при радиоактивном излучении? Ответить на этот вопрос в начале XX в. было очень не просто. Уже в самом начале исследований радиоактивности обнаружилось много странного и необычного.

Во-первых, удивительным было постоянство, с которым радиоактивные элементы уран, торий и радий испускают излучения. На протяжении суток, месяцев и даже лет интенсивность излучения заметно не изменялась. На нее не оказывали никакого влияния такие обычные воздействия, как нагревание и увеличение давления. Химические реакции, в которые вступали радиоактивные вещества, также не влияли на интенсивность излучения.

Во-вторых, очень скоро после открытия радиоактивности выяснилось, что радиоактивность сопровождается выделением энергии. Пьер Кюри поместил ампулу с хлоридом радия в калориметр. В нем поглощались α-, β- и γ-лучи, и за счет их энергии калориметр нагревался. Кюри определил, что радий массой 1 г выделяет за 1 ч энергию, примерно равную 582 Дж. И такая энергия выделяется непрерывно на протяжении многих лет!

Откуда же берется энергия, на выделение которой не оказывают никакого влияния все известные воздействия? По-видимому, при радиоактивности вещество испытывает какие-то глубокие изменения, совершенно отличные от обычных химических превращений. Было сделано предположение, что превращения претерпевают сами атомы. Сейчас эта мысль не может вызвать особого удивления, так как о ней ребенок может услышать еще раньше, чем научится читать. Но в начале XX в. она казалась фантастической, и нужна была большая смелость, чтобы решиться высказать ее. В то время только что были получены бесспорные доказательства существования атомов. Идея Демокрита об атомистическом строении вещества наконец восторжествовала. И вот почти сразу же вслед за этим неизменность атомов ставится под сомнение.

Не будем рассказывать подробно о тех экспериментах, которые привели в конце концов к полной уверенности

в том, что при радиоактивном распаде происходит цепочка последовательных превращений атомов. Остановимся только на самых первых опытах, начатых Резерфордом и продолженных им совместно с английским химиком Ф. Содди.

Резерфорд обнаружил, что **активность** тория, определяемая как число α-частиц, испускаемых в единицу времени, остается неизменной в закрытой ампуле. Если же препарат обдувается даже очень слабыми потоками воздуха, то активность тория сильно уменьшается. Ученый предположил, что одновременно с α-частицами торий испускает какой-то радиоактивный газ.

Отсасывая воздух из ампулы, содержащей торий, Резерфорд выделил радиоактивный газ и исследовал его ионизирующую способность. Оказалось, что активность этого газа (в отличие от активности тория, урана и радия) очень быстро убывает со временем. Каждую минуту активность убывает вдвое, и через десять минут она становится практически равной нулю. Содди исследовал химические свойства этого газа и установил, что он не вступает ни в какие реакции, т. е. является инертным газом. Впоследствии этот газ был назван радоном и помещен в периодической системе Д. И. Менделеева под порядковым номером 86.

Превращения испытывали и другие радиоактивные элементы: уран, актиний, радий. Общий вывод, который сделали ученые, был точно сформулирован Резерфордом: «Атомы радиоактивного вещества подвержены спонтанным[1] видоизменениям. В каждый момент небольшая часть общего числа атомов становится неустойчивой и взрывообразно распадается. В подавляющем большинстве случаев выбрасывается с огромной скоростью осколок атома — α-частица. В некоторых других случаях взрыв сопровождается выбрасыванием быстрого электрона и появлением лучей, обладающих, подобно рентгеновским лучам, большой проникающей способностью и называемых γ-излучением.

Было обнаружено, что в результате атомного превращения образуется вещество совершенно нового вида, полностью отличное по своим физическим и химическим свойствам от первоначального вещества. Это новое вещество, однако, само также неустойчиво и испытывает превращение с испусканием характерного радиоактивного излучения[2].

Таким образом, точно установлено, что атомы некоторых элементов подвержены спонтанному распаду, сопровождающемуся излучением энергии в количествах, огромных по сравнению с энергией, освобождающейся при обычных молекулярных видоизменениях».

---

[1] От латинского слова spontaneus — самопроизвольный.

[2] В действительности могут образовываться и стабильные ядра.

После того как было открыто атомное ядро, сразу же стало ясно, что именно оно претерпевает изменения при радиоактивных превращениях. Ведь α-частиц вообще нет в электронной оболочке, а уменьшение числа электронов оболочки на единицу превращает атом в ион, а не в новый химический элемент. Выброс же электрона из ядра меняет заряд ядра (увеличивает его) на единицу.

Итак, *радиоактивность представляет собой самопроизвольное превращение одних ядер в другие, сопровождаемое испусканием различных частиц.*

Правило смещения. Превращения ядер подчиняются так называемому правилу смещения, сформулированному впервые Содди: *при α-распаде ядро теряет положительный заряд 2e и его масса M убывает примерно на четыре атомные единицы массы. В результате элемент смещается на две клетки к началу периодической системы.* Символически это можно записать так:

$$ {}^{M}_{Z}X \rightarrow {}^{M-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He. $$

Здесь элемент обозначается, как и в химии, общепринятыми символами: заряд ядра записывается в виде индекса слева внизу у символа, а атомная масса — в виде индекса слева вверху у символа. Например, водород обозначается символом ${}^{1}_{1}H$. Для α-частицы, являющейся ядром атома гелия, применяется обозначение ${}^{4}_{2}He$ и т. д. При β-распаде из ядра вылетает электрон. В результате заряд ядра увеличивается на единицу, а масса остается почти неизменной:

$$ {}^{M}_{Z}X \rightarrow {}^{M}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}e + {}^{0}_{0}\tilde{\nu}_e. $$

Здесь ${}^{0}_{-1}e$ обозначает электрон: индекс 0 вверху означает, что масса его очень мала по сравнению с атомной единицей массы, $\tilde{\nu}_e$ — электронное антинейтрино — нейтральная частица с очень малой (возможно, нулевой) массой, уносящая при β-распаде часть энергии. Образованием антинейтрино сопровождается β-распад любого ядра и в уравнениях соответствующих реакций эту частицу часто не указывают.

После β-распада элемент смещается на одну клетку ближе к концу периодической системы. Гамма-излучение не сопровождается изменением заряда; масса же ядра меняется ничтожно мало.

Согласно правилу смещения при радиоактивном распаде сохраняется суммарный электрический заряд и приближенно сохраняется относительная атомная масса ядер.

Возникшие при радиоактивном распаде новые ядра могут быть также радиоактивны и испытывать дальнейшие превращения.

При радиоактивном распаде происходит превращение атомных ядер.



Какие из известных вам законов сохранения выполняются при радиоактивном распаде?

§ 101 ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА. ПЕРИОД ПОЛУРАСПАДА

Радиоактивный распад подчиняется статистическому закону. Резерфорд, исследуя превращения радиоактивных веществ, установил опытным путем, что их активность убывает с течением времени. Об этом говорилось в предыдущем параграфе. Так, активность радона убывает в 2 раза уже через 1 мин. Активность таких элементов, как уран, торий и радий, тоже убывает со временем, но гораздо медленнее. Для каждого радиоактивного вещества существует определенный интервал времени, на протяжении которого активность убывает в 2 раза. Этот интервал носит название *период полураспада*. **Период полураспада** T — это время, в течение которого распадается половина начального числа радиоактивных атомов.

Спад активности, т. е. числа распадов в секунду, в зависимости от времени для одного из радиоактивных препаратов изображен на рисунке 13.8. Период полураспада этого вещества равен 5 сут.

Выведем теперь математическую форму закона радиоактивного распада. Пусть число радиоактивных атомов в начальный момент времени ($t = 0$) равно N_0. Тогда по истечении периода полураспада это число будет равно $\frac{N_0}{2}$. Спустя еще один такой же интервал времени это число станет равным:

$$\frac{1}{2}\frac{N_0}{2} = \frac{N_0}{4} = \frac{N}{2^2}.$$

По истечении времени $t = nT$, т. е. спустя n периодов полураспада T, радиоактивных атомов останется:

$$N = N_0 \frac{1}{2^n}.$$

Поскольку

$$n = \frac{t}{T},$$

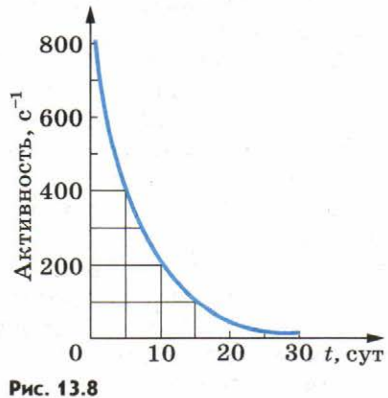


Рис. 13.8

то

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}. \qquad (13.1)$$

Это и есть основной **закон радиоактивного распада**. По формуле (13.1) можно найти число нераспавшихся ядер в любой момент времени.

Период полураспада — основная величина, определяющая скорость радиоактивного распада. Чем меньше период полураспада, тем меньше времени «живут» ядра, тем быстрее происходит распад. Для разных веществ период полураспада имеет сильно различающиеся значения. Так, период полураспада урана $^{238}_{92}U$ равен 4,5 млрд лет. Именно поэтому активность урана на протяжении нескольких лет заметно не меняется. Период полураспада радия значительно меньше — он равен 1600 лет. Поэтому активность радия значительно больше активности урана. Есть радиоактивные элементы с периодом полураспада в миллионные доли секунды.

Чтобы, пользуясь формулой (13.1), определить период полураспада, надо знать число атомов N_0 в начальный момент времени и число нераспавшихся атомов N спустя определенный интервал времени t.

Сам закон радиоактивного распада довольно прост. Но физический смысл этого закона уяснить себе нелегко. Действительно, согласно этому закону за любой интервал времени распадается *одна и та же доля* имеющихся атомов (за период полураспада половина атомов). Значит, с течением времени скорость распада нисколько не меняется?

Радиоактивные ядра «не стареют». Так, ядра радона, возникающие при распаде радия, претерпевают радиоактивный распад как сразу же после своего образования, так и спустя 10 мин после этого. Распад любого атомного ядра — это, так сказать, не «смерть от старости», а «несчастный случай» в его жизни. Для радиоактивных ядер не существует понятия возраста. Можно определить лишь их *среднее время жизни* τ.

Время существования отдельных ядер может варьироваться от долей секунды до миллиардов лет. Атом урана, например, может спокойно пролежать в земле миллиарды лет и внезапно взорваться, тогда как его соседи благополучно продолжают оставаться в прежнем состоянии. Среднее время жизни τ — это просто среднее арифметическое времени жизни достаточно большого количества атомов данного вида. Оно прямо пропорционально периоду полураспада. Предсказать, когда произойдет распад ядра данного атома, невозможно. Смысл имеют только утверждения о поведении в среднем большой совокупности атомов. Закон радиоактивного распада определяет *среднее число ядер атомов*,

распадающихся за определенный интервал времени. Но всегда имеются неизбежные отклонения от среднего значения, и, чем меньше количество радиоактивных ядер в препарате, тем больше эти отклонения. Закон радиоактивного распада является *статистическим законом*.

Говорить об определенном законе радиоактивного распада для малого числа ядер атомов не имеет смысла. Этот закон справедлив в основном для большого количества частиц.



Счетчик регистрирует β-частицы радиоактивного препарата очень малой интенсивности. Происходят ли срабатывания счетчика через одинаковые интервалы времени?

§ 102 ИЗОТОПЫ

Изучение явления радиоактивности привело к важному открытию: была выяснена природа атомных ядер.

В результате наблюдения огромного числа радиоактивных превращений постепенно обнаружилось, что существуют вещества, тождественные по своим химическим свойствам, но имеющие совершенно различные радиоактивные свойства (т. е. распадающиеся по-разному). Их никак не удавалось разделить ни одним из известных химических способов. На этом основании Содди в 1911 г. высказал предположение о возможности существования элементов с одинаковыми химическими свойствами, но различающихся, в частности, своей радиоактивностью. Эти элементы нужно помещать в одну и ту же клетку периодической системы Д. И. Менделеева. Содди назвал их **изотопами** (т. е. занимающими одинаковые места).

Предположение Содди получило блестящее подтверждение и глубокое толкование год спустя, когда Дж. Дж. Томсон провел точные измерения массы ионов неона методом отклонения их в электрическом и магнитном полях. Он обнаружил, что неон представляет собой смесь двух видов атомов. Бóльшая часть их имеет относительную массу, равную 20. Но существует незначительная часть атомов с относительной атомной массой 22. В результате относительная атомная масса смеси была принята равной 20,2. Атомы, обладающие одними и теми же химическими свойствами, различались массой. Оба вида атомов неона, естественно, занимают одно и то же место в таблице Д. И. Менделеева и, следовательно, являются изотопами. Таким образом, изотопы могут различаться не только своими радиоактивными свойствами, но и массой. Именно поэтому у изотопов заря-

ды атомных ядер одинаковы, а значит, число электронов в оболочках атомов и, следовательно, химические свойства изотопов одинаковы. Но массы ядер различны. Причем ядра могут быть как радиоактивными, так и стабильными. Различие свойств радиоактивных изотопов связано с тем, что их ядра имеют различную массу.

В настоящее время установлено существование изотопов у большинства химических элементов. Некоторые элементы имеют только нестабильные (т. е. радиоактивные) изотопы. Изотопы есть у самого тяжелого из существующих в природе элементов — урана (относительные атомные массы 238, 235 и др.) и у самого легкого — водорода (относительные атомные массы 1, 2, 3).

Особенно интересны изотопы водорода, так как они различаются по массе в 2 и 3 раза. Изотоп с относительной атомной массой 2 называется **дейтерием**. Он стабилен (т. е. не радиоактивен) и входит в качестве небольшой примеси (1 : 4500) в обычный водород. При соединении дейтерия с кислородом образуется так называемая **тяжелая вода**. Ее физические свойства заметно отличаются от свойств обычной воды. При нормальном атмосферном давлении она кипит при 101,2 °С и замерзает при 3,8 °С.

Изотоп водорода с атомной массой 3 называется **тритием**. Он β-радиоактивен, и его период полураспада около 12 лет.

Существование изотопов доказывает, что заряд атомного ядра определяет не все свойства атома, а лишь его химические свойства и те физические свойства, которые зависят от периферии электронной оболочки, например размеры атома. Масса же атома и его радиоактивные свойства не определяются порядковым номером в таблице Д. И. Менделеева.

Примечательно, что при точном измерении относительных атомных масс изотопов выяснилось, что они близки к целым числам. А вот атомные массы химических элементов иногда сильно отличаются от целых чисел. Так, относительная атомная масса хлора равна 35,5. Это значит, что в естественном состоянии химически чистое вещество представляет собой смесь изотопов в различных пропорциях. Целочисленность (приближенная) относительных атомных масс изотопов очень важна для выяснения строения атомного ядра.

Большинство химических элементов имеют изотопы. Заряды атомных ядер изотопов одинаковы, но массы ядер различны.



Существуют ли изотопы у бария, относительная атомная масса которого 137,34?

§ 103 ОТКРЫТИЕ НЕЙТРОНА

Важнейшим этапом в развитии физики атомного ядра было открытие нейтрона в 1932 г.

Искусственное превращение атомных ядер. Впервые в истории человечества искусственное превращение ядер осуществил Резерфорд в 1919 г. Это было уже не случайное открытие.

Так как ядро весьма устойчиво, и ни высокие температуры, ни давления, ни электромагнитные поля не вызывают превращения элементов и не влияют на скорость радиоактивного распада, то Резерфорд предположил, что для разрушения или преобразования ядра нужна очень большая энергия. Наиболее подходящими носителями большой энергии в то время были α-частицы, вылетающие из ядер при радиоактивном распаде.

Первым ядром, подвергшимся искусственному преобразованию, было ядро атома азота $^{14}_{7}N$. Бомбардируя азот α-частицами большой энергии, испускаемыми радием, Резерфорд обнаружил появление протонов — ядер атома водорода.

В первых опытах регистрация протонов проводилась методом сцинтилляций[1], и их результаты не были достаточно убедительными и надежными. Но спустя несколько лет превращение азота удалось наблюдать в камере Вильсона. Примерно одна α-частица на каждые 50 000 α-частиц, испущенных радиоактивным препаратом в камере, поглощается ядром азота, что и приводит к испусканию протона. При этом ядро азота превращается в ядро изотопа кислорода:

$$^{14}_{7}N + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{17}_{8}O + ^{1}_{1}H.$$

На рисунке 13.9 показана одна из фотографий этого процесса. Слева видна характерная «вилка» — разветвление трека. Жирный след принадлежит ядру кислорода, а тонкий — протону. Остальные α-частицы не претерпевают столкновений с ядрами, и их треки прямолинейны. Другими исследователями были обнаружены превращения под влиянием α-частиц ядер фтора, натрия, алюминия и др., сопровождающиеся испусканием протонов. Ядра тяжелых элементов, находящихся в конце периодической системы, не испытывали превращений. Очевидно, из-за

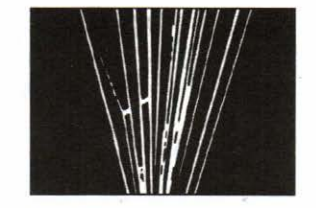


Рис. 13.9

[1] Сцинтилляция — вспышка, происходящая при попадании частиц на поверхность, покрытую слоем специального вещества, например слоем сульфида цинка.



Жолио-Кюри Фредерик (1900—1958) — французский ученый и прогрессивный общественный деятель. Совместно с женой Ирен открыл в 1934 г. искусственную радиоактивность. Большое значение для открытия нейтронов имели работы супругов Кюри по исследованию излучения бериллия под действием α-частиц. С сотрудниками в 1939 г. впервые определил среднее число нейтронов, вылетающих при делении ядра атома урана, и показал принципиальную возможность цепной ядерной реакции с освобождением энергии.

большого электрического (положительного) заряда α-частица не могла приблизиться к ядру вплотную.

Открытие нейтрона. В 1932 г. произошло важнейшее для всей ядерной физики событие: учеником Резерфорда английским физиком Д. Чедвиком был открыт *нейтрон*.

При бомбардировке бериллия α-частицами протоны не появлялись. Но обнаружилось какое-то сильно проникающее излучение, способное преодолеть такую преграду, как свинцовая пластина толщиной 10—20 см. Было сделано предположение, что это γ-лучи большой энергии.

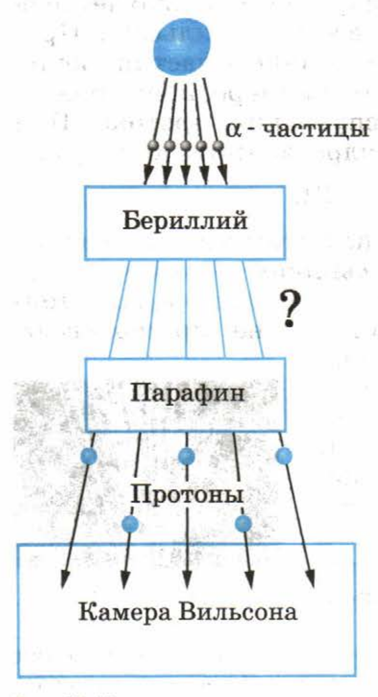


Рис. 13.10

Ирен Жолио-Кюри (дочь Марии и Пьера Кюри) и ее муж Фредерик Жолио-Кюри обнаружили, что если на пути излучения, образующегося при бомбардировке бериллия α-частицами, поставить парафиновую пластину, то ионизирующая способность этого излучения резко увеличивается. Они справедливо предположили, что излучение выбивает из парафиновой пластины протоны, имеющиеся в большом количестве в таком водородсодержащем веществе. С помощью камеры Вильсона (схема опыта приведена на рисунке 13.10) супруги Жолио-Кюри обнаружили эти протоны и по длине пробега оценили их энергию. По их данным, если протоны ускорялись в результате столкновения с γ-квантами, то энергия этих квантов должна была быть огромной — около 55 МэВ.

Чедвик наблюдал в камере Вильсона треки ядер азота, испытавших столкновение с бериллиевым излучением. По его оценке, энергия γ-квантов, способных сообщать ядрам азота скорость, которая обнаруживалась в этих наблюдениях, должна была составлять 90 МэВ. Аналогичные же наблюдения в камере Вильсона треков ядер аргона привели к выводу, что энергия этих гипотетических γ-квантов должна составлять 150 МэВ. Таким образом, считая, что ядра приходят в движение в результате столкновения с безмассовыми частицами, исследователи пришли к явному противоречию: одни и те же γ-кванты обладали различной энергией.

Стало очевидным, что предположение об излучении бериллием γ-квантов, т. е. безмассовых частиц, несостоятельно. Из бериллия под действием α-частиц вылетают какие-то достаточно тяжелые частицы. Ведь только при столкновении с тяжелыми частицами протоны или ядра азота и аргона могли получить ту большую энергию, которая наблюдалась на опыте. Поскольку эти частицы обладали большой проникающей способностью и непосредственно не ионизировали газ, то, следовательно, они были электрически нейтральными. Ведь заряженная частица сильно взаимодействует с веществом и поэтому быстро теряет свою энергию.

Новая частица была названа *нейтроном*. Существование ее предсказывал Резерфорд более чем за 10 лет до опытов Чедвика. По энергии и импульсу ядер, сталкивающихся с нейтронами, была определена масса этих новых частиц. Она оказалась чуть больше массы протона — 1838,6 электронной массы вместо 1836,1 для протона. Было установлено в итоге, что при попадании α-частиц в ядра бериллия происходит следующая реакция:

$$^9_4\mathrm{Be} + {}^4_2\mathrm{He} \rightarrow {}^{12}_6\mathrm{C} + {}^1_0n.$$

Здесь ^1_0n — символ нейтрона; его заряд равен нулю, а относительная масса — примерно единице.

Нейтрон — нестабильная частица: свободный нейтрон за время около 15 мин распадается на протон, электрон и нейтрино — безмассовую нейтральную частицу.

Элементарная частица — нейтрон — не имеет электрического заряда. Масса нейтрона больше массы протона примерно на 2,5 электронной массы.



Объясните, почему при центральном столкновении с протоном нейтрон передает ему всю энергию, а при столкновении с ядром азота — только ее часть.

§ 104 СТРОЕНИЕ АТОМНОГО ЯДРА. ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ

Сразу же после того, как в опытах Чедвика был открыт нейтрон, советский физик Д. Д. Иваненко и немецкий ученый В. Гейзенберг в 1932 г. предложили протонно-нейтронную модель ядра. Она была подтверждена последующими исследованиями ядерных превращений и в настоящее время является общепризнанной.

Протонно-нейтронная модель ядра. Согласно протонно-нейтронной модели ядра состоят из элементарных частиц двух видов — протонов и нейтронов.

Так как в целом атом электрически нейтрален, а заряд протона равен модулю заряда электрона, то число протонов в ядре равно числу электронов в атомной оболочке. Следовательно, число протонов в ядре равно атомному номеру элемента Z в периодической системе элементов Д. И. Менделеева.

Сумму числа протонов Z и числа нейтронов N в ядре называют **массовым числом** и обозначают буквой A:

$$A = Z + N. \qquad (13.2)$$

Массы протона и нейтрона близки друг к другу, и каждая из них примерно равна атомной единице массы. Масса электронов в атоме много меньше массы его ядра. Поэтому массовое число ядра равно округленной до целого числа относительной атомной массе элемента. Массовые числа могут быть определены путем приближенного измерения массы ядер приборами, не обладающими высокой точностью.

Изотопы представляют собой ядра с одним и тем же значением Z, но с различными массовыми числами A, т. е. с различными числами нейтронов N.

Ядерные силы. Так как ядра весьма устойчивы, то протоны и нейтроны должны удерживаться внутри ядра какими-то силами, причем очень большими. Что это за силы? Сразу можно сказать, что это не гравитационные силы, которые слишком слабые. Устойчивость ядра не может быть объяснена также электромагнитными силами, так как между одноименно заряженными протонами действует электрическое отталкивание. А нейтроны не имеют электрического заряда.

Значит, между ядерными частицами — протонами и нейтронами (их называют *нуклонами*) — действуют особые силы, называемые **ядерными силами**.

Каковы основные свойства ядерных сил? Ядерные силы примерно в 100 раз превышают электрические (кулоновские) силы. Это самые мощные силы из всех существующих в природе. Поэтому взаимодействия ядерных частиц часто называют *сильными взаимодействиями*.

Сильные взаимодействия проявляются не только во взаимодействиях нуклонов в ядре. Это особый тип взаимодействий, присущий большинству элементарных частиц наряду с электромагнитными взаимодействиями.

Другая важная особенность ядерных сил — их короткодействие. Электромагнитные силы сравнительно медленно ослабевают с увеличением расстояния. Ядерные силы заметно проявляются лишь на расстояниях, равных размерам ядра (10^{-12}—10^{-13} см), что показали уже опыты Резерфорда по рассеянию α-частиц атомными ядрами. Ядерные силы — это, так сказать, «богатырь с очень короткими руками». Законченная количественная теория ядерных сил пока еще не разработана. Значительные успехи в ее разработке были достигнуты совсем недавно — в последние 10—15 лет.

Ядра атомов состоят из протонов и нейтронов. Эти частицы удерживаются в ядре ядерными силами.



Каковы главные особенности ядерных сил?

§ 105 ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ АТОМНЫХ ЯДЕР

Важнейшую роль во всей ядерной физике играет понятие энергии связи ядра. Энергия связи позволяет объяснить устойчивость ядер, выяснить, какие процессы ведут к выделению ядерной энергии. Нуклоны в ядре прочно удерживаются ядерными силами. Для того чтобы удалить нуклон из ядра, надо совершить довольно большую работу, т. е. сообщить ядру значительную энергию.

Под **энергией связи ядра** понимают ту энергию, которая необходима для полного расщепления ядра на отдельные нуклоны. На основе закона сохранения энергии можно также утверждать, что *энергия связи ядра равна той энергии, которая выделяется при образовании ядра из отдельных частиц.*

Энергия связи атомных ядер очень велика. Но как ее определить?

В настоящее время рассчитать энергию связи теоретически, подобно тому как это можно сделать для электронов

в атоме, не удается. Выполнить соответствующие расчеты можно, лишь применяя соотношение Эйнштейна между массой и энергией:

$$E = mc^2. \quad (13.3)$$

Точнейшие измерения масс ядер показывают, что *масса покоя ядра $M_я$ всегда меньше суммы масс входящих в его состав протонов и нейтронов:*

$$M_я < Zm_p + Nm_n. \quad (13.4)$$

Существует, как говорят, **дефект масс**: разность масс

$$\Delta M = Zm_p + Nm_n - M_я$$

положительна. В частности, для гелия масса ядра на 0,75% меньше суммы масс двух протонов и двух нейтронов. Соответственно для гелия в количестве вещества один моль $\Delta M = 0{,}03$ г.

Уменьшение массы при образовании ядра из нуклонов означает, что при этом уменьшается энергия этой системы нуклонов на значение энергии связи $E_{св}$:

$$E_{св} = \Delta Mc^2 = (Zm_p + Nm_n - M_я)\,c^2. \quad (13.5)$$

Но куда при этом исчезают энергия $E_{св}$ и масса ΔM?

При образовании ядра из частиц последние за счет действия ядерных сил на малых расстояниях устремляются с огромным ускорением друг к другу. Излучаемые при этом γ-кванты как раз обладают энергией $E_{св}$ и массой $\Delta M = \frac{E_{св}}{c^2}$.

Энергия связи — это энергия, которая выделяется при образовании ядра из отдельных частиц, и соответственно это та энергия, которая необходима для расщепления ядра на составляющие его частицы.

О том, как велика энергия связи, можно судить по такому примеру: образование 4 г гелия сопровождается выделением такой же энергии, что и при сгорании 1,5—2 вагонов каменного угля.

Важную информацию о свойствах ядер содержит зависимость *удельной энергии связи* от массового числа A.

Удельной энергией связи называют энергию связи, приходящуюся на один нуклон ядра. Ее определяют экспериментально. Из рисунка 13.11 хорошо видно, что, не считая самых легких ядер, удельная энергия связи примерно постоянна и равна 8 МэВ/нуклон. Отметим, что энергия связи электрона и ядра в атоме водорода, равная энергии ионизации, почти в миллион раз меньше этого значения. Кривая на рисунке 13.11 имеет слабо выраженный максимум. Мак-

Рис. 13.11

симальную удельную энергию связи (8,6 МэВ/нуклон) имеют элементы с массовыми числами от 50 до 60, т. е. железо и близкие к нему по порядковому номеру элементы. Ядра этих элементов наиболее устойчивы.

У тяжелых ядер удельная энергия связи уменьшается за счет возрастающей с увеличением Z кулоновской энергии отталкивания протонов. Кулоновские силы стремятся разорвать ядро.

Частицы в ядре сильно связаны друг с другом. Энергия связи частиц определяется по дефекту масс.



1. **Что называют энергией связи ядра?**
2. **Почему ядро меди более устойчиво, чем ядро урана?**

§ 106 ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Атомные ядра при взаимодействиях испытывают превращения. Эти превращения сопровождаются увеличением или уменьшением кинетической энергии участвующих в них частиц.

Ядерными реакциями называют изменения атомных ядер при взаимодействии их с элементарными частицами или друг с другом. С примерами ядерных реакций вы уже ознакомились в § 103. Ядерные реакции происходят, когда частицы вплотную приближаются к ядру и попадают в сферу действия ядерных сил. Одноименно заряженные частицы отталкиваются друг от друга. Поэтому сближение положительно заряженных частиц с ядрами (или ядер друг с другом) возможно, если этим частицам (или ядрам) сообщена достаточно большая кинетическая энергия. Эта энергия сообщается протонам, ядрам дейтерия — дейтронам, α-частицам и другим более тяжелым ядрам с помощью ускорителей.

Для осуществления ядерных реакций такой метод гораздо эффективнее, чем использование ядер гелия, испускаемых радиоактивными элементами. *Во-первых*, с помощью ускорителей частицам может быть сообщена энергия порядка 10^5 МэВ, т. е. гораздо большая той, которую имеют α-частицы (максимально 9 МэВ). *Во-вторых*, можно использовать протоны, которые в процессе радиоактивного распада не появляются (это целесообразно потому, что заряд протонов вдвое меньше заряда α-частиц, и поэтому действующая на них сила отталкивания со стороны ядер тоже в 2 раза меньше). *В-третьих*, можно ускорить ядра более тяжелые, чем ядра гелия.

Первая ядерная реакция на быстрых протонах была осуществлена в 1932 г. Удалось расщепить литий на две α-частицы:

$$^7_3\text{Li} + ^1_1\text{H} \to ^4_2\text{He} + ^4_2\text{He}.$$

Как видно из фотографии треков в камере Вильсона (рис. 13.12), ядра гелия разлетаются в разные стороны вдоль одной прямой согласно закону сохранения импульса (импульс протона много меньше импульса возникающих α-частиц; на фотографии треки протонов не видны).

Энергетический выход ядерных реакций. В описанной выше ядерной реакции кинетическая энергия двух образующихся ядер гелия оказалась больше кинетической энергии вступившего в реакцию протона на 7,3 МэВ. Превращение ядер сопровождается изменением их внутренней энергии (энергия связи). В рассмотренной реакции удельная энергия связи в ядрах гелия больше удельной энергии связи в ядре лития. Поэтому часть внутренней энергии ядра лития превращается в кинетическую энергию разлетающихся α-частиц.

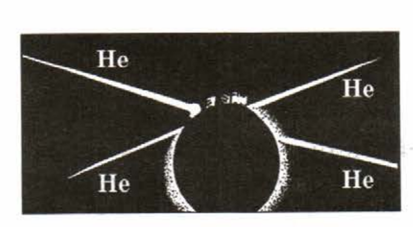


Рис. 13.12

Изменение энергии связи ядер означает, что суммарная энергия покоя участвующих в реакциях ядер и частиц не остается неизменной. Ведь энергия покоя ядра $M_яc^2$ согласно формуле (13.5) непосредственно выражается через энергию связи. В соответствии с законом сохранения энергии *изменение кинетической энергии в процессе ядерной реакции равно изменению энергии покоя участвующих в реакции ядер и частиц.*

Энергетическим выходом ядерной реакции называется разность энергий покоя ядер и частиц до реакции и после реакции. Согласно вышесказанному энергетический выход ядерной реакции равен также изменению кинетической энергии частиц, участвующих в реакции.

Если суммарная кинетическая энергия ядер и частиц после реакции больше, чем до реакции, то говорят о выделении энергии. В противном случае реакция идет с поглощением энергии. Именно такая реакция происходит при бомбардировке азота α-частицами (см. § 103). Часть кинетической энергии (примерно $1,2 \cdot 10^6$ эВ) переходит в процессе этой реакции во внутреннюю энергию вновь образовавшегося ядра.

Выделяющаяся при ядерных реакциях энергия может быть огромной. Но использовать ее при столкновениях ускоренных частиц (или ядер) с неподвижными ядрами мишени практически нельзя. Ведь бо́льшая часть ускоренных частиц пролетает мимо ядер мишени, не вызывая реакцию.

Ядерные реакции на нейтронах. Открытие нейтрона было поворотным пунктом в исследовании ядерных реакций. Так как нейтроны не имеют заряда, то они беспрепятственно проникают в атомные ядра и вызывают их изменения. Например, наблюдается следующая реакция:

$$^{27}_{13}\mathrm{Al} + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{24}_{11}\mathrm{Na} + ^{4}_{2}\mathrm{He}.$$

Великий итальянский физик Энрико Ферми первым начал изучать реакции, вызываемые нейтронами. Он обнаружил, что ядерные превращения обусловлены не только быстрыми, но и медленными нейтронами. Причем эти медленные нейтроны оказываются в большинстве случаев даже гораздо более эффективными, чем быстрые. Поэтому быстрые нейтроны целесообразно предварительно замедлять. Замедление нейтронов до тепловых скоростей происходит в обыкновенной воде. Этот эффект объясняется тем, что в воде содержится большое число ядер водорода — протонов, масса которых почти равна массе нейтронов. Следовательно, нейтроны после соударений движутся со скоростью теплового движения. При центральном соударении нейтрона с покоящимся протоном он целиком передает протону свою кинетическую энергию.

Реакции, в которые вступают атомные ядра, очень разнообразны. Нейтроны не отталкиваются ядрами и поэтому особенно эффективно вызывают превращения ядер.



1. **Объясните, используя рисунок 13.11, почему при ядерной реакции $^{7}_{3}Li + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{4}_{2}He + ^{4}_{2}He$ энергия не поглощается, а выделяется.**
2. **Что называют энергетическим выходом ядерной реакции?**
3. **В чем главное отличие ядерных реакций на нейтронах от ядерных реакций, вызываемых заряженными частицами?**

§ 107 ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР УРАНА

Делиться на части могут только ядра некоторых тяжелых элементов. При делении ядер испускаются два-три нейтрона и γ-лучи. Одновременно выделяется большая энергия.

Открытие деления урана. Деление ядер урана было открыто в 1938 г. немецкими учеными О. Ганом и Ф. Штрассманом. Они установили, что при бомбардировке урана нейтронами возникают элементы средней части периодической системы: барий, криптон и др. Однако правильное истолкование этого факта именно как деления ядра урана, захватившего нейтрон, было дано в начале 1939 г. английским физиком О. Фришем совместно с австрийским физиком Л. Мейтнер.

Захват нейтрона нарушает стабильность ядра. Ядро возбуждается и становится неустойчивым, что приводит к его делению на осколки. Деление ядра возможно потому, что масса покоя тяжелого ядра больше суммы масс покоя осколков, возникающих при делении. Поэтому происходит выделение энергии, эквивалентной уменьшению массы покоя, сопровождающему деление.

Возможность деления тяжелых ядер можно также объяснить с помощью графика зависимости удельной энергии связи от массового числа A (см. рис. 13.11). Удельная энергия связи ядер атомов элементов, занимающих в периодической системе последние места ($A \approx 200$), примерно на 1 МэВ меньше удельной энергии связи в ядрах элементов, находящихся в середине периодической системы ($A \approx 100$). Поэтому процесс деления тяжелых ядер на ядра элементов средней части периодической системы является энергетически выгодным. Система после деления переходит в состояние с минимальной внутренней энергией. Ведь, чем больше энергия связи ядра, тем большая энергия должна выделяться при возникновении ядра и, следовательно, тем меньше внутренняя энергия образовавшейся вновь системы.

При делении ядра энергия связи, приходящаяся на каждый нуклон, увеличивается на 1 МэВ и общая выделяющаяся энергия должна быть огромной — порядка 200 МэВ. Ни при какой другой ядерной реакции (не связанной с делением) столь больших энергий не выделяется.

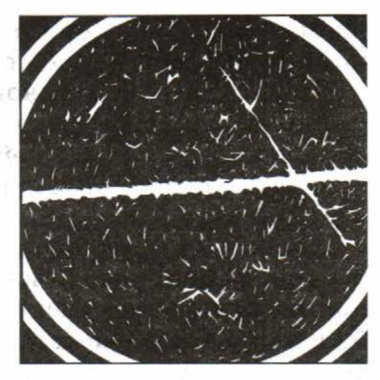


Рис. 13.13

Непосредственные измерения энергии, выделяющейся при делении ядра урана $^{235}_{92}U$, подтвердили приведенные соображения и дали значение ≈200 МэВ. Причем бóльшая часть этой энергии (168 МэВ) приходится на кинетическую энергию осколков. На рисунке 13.13 вы видите треки осколков делящегося урана в камере Вильсона.

Выделяющаяся при делении ядра энергия имеет электростатическое, а не ядерное происхождение. Большая кинетическая энергия, которую имеют осколки, возникает вследствие их кулоновского отталкивания.

Механизм деления ядра. Процесс деления атомного ядра можно объяснить на основе капельной модели ядра. Согласно этой модели сгусток нуклонов напоминает капельку заряженной жидкости (рис. 13.14, *а*). Ядерные силы между нуклонами являются короткодействующими, подобно силам, действующим между молекулами жидкости. Наряду с большими силами электростатического отталкивания между протонами, стремящимися разóрвать ядро на части, действуют еще бóльшие ядерные силы притяжения. Эти силы удерживают ядро от распада.

Ядро урана-235 имеет форму шара. Поглотив лишний нейтрон, оно возбуждается и начинает деформироваться, приобретая вытянутую форму (рис. 13.14, *б*). Ядро будет растягиваться до тех пор, пока силы отталкивания между половинками вытянутого ядра не начнут преобладать над силами притяжения, действующими в перешейке (рис. 13.14, *в*). После этого оно разрывается на две части (рис. 13.14, *г*). Под дейст-

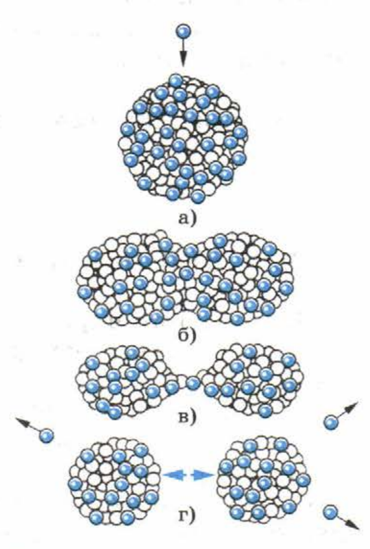


Рис. 13.14

вием кулоновских сил отталкивания эти осколки разлетаются со скоростью, равной 1/30 скорости света.

Испускание нейтронов в процессе деления. Фундаментальный факт ядерного деления — испускание в процессе деления двух-трех нейтронов. Именно благодаря этому оказалось возможным практическое использование внутриядерной энергии.

Понять, почему происходит испускание свободных нейтронов, можно исходя из следующих соображений. Известно, что отношение числа нейтронов к числу протонов в стабильных ядрах возрастает с повышением атомного номера. Поэтому у возникающих при делении осколков относительное число нейтронов оказывается бо́льшим, чем это допустимо для ядер атомов, находящихся в середине таблицы Менделеева. В результате несколько нейтронов освобождается в процессе деления. Их энергия имеет различные значения — от нескольких миллионов электрон-вольт до совсем малых, близких к нулю.

Деление обычно происходит на осколки, массы которых отличаются примерно в 1,5 раза. Осколки эти сильно радиоактивны, так как содержат избыточное количество нейтронов. В результате серии последовательных β-распадов в конце концов получаются стабильные изотопы.

В заключение отметим, что существует также спонтанное деление ядер урана. Оно было открыто советскими физиками Г. Н. Флеровым и К. А. Петржаком в 1940 г. Период полураспада для спонтанного деления равен 10^{16} лет. Это в два миллиона раз больше периода полураспада при α-распаде урана.

Реакция деления ядер сопровождается выделением энергии.

§ 108 ЦЕПНЫЕ ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

При делении ядра урана освобождаются два-три нейтрона. Это позволяет осуществлять цепную реакцию деления урана.

Любой из нейтронов, вылетающих из ядра в процессе деления, может, в свою очередь, вызвать деление соседнего ядра, которое также испускает нейтроны, способные вызвать дальнейшее деление. В результате число делящихся ядер очень быстро увеличивается. Возникает цепная реакция. **Ядерной цепной реакцией** называется реакция, в ко-

торой частицы, вызывающие ее (нейтроны), образуются как продукты этой реакции.

Цепная реакция сопровождается выделением огромной энергии. При делении каждого ядра выделяется энергия около 200 МэВ. При полном же делении всех ядер, имеющихся в 1 г урана, выделяется энергия $2{,}3 \cdot 10^4$ кВт · ч. Это эквивалентно энергии, получаемой при сгорании 3 т угля или 2,5 т нефти.

Но для осуществления цепной реакции нельзя использовать любые ядра, делящиеся под влиянием нейтронов. В силу ряда причин из ядер, встречающихся в природе, пригодны лишь ядра изотопа урана с массовым числом 235, т. е. $^{235}_{92}U$.

Изотопы урана. Естественный уран состоит в основном из двух изотопов: $^{235}_{92}U$ и $^{238}_{92}U$. Но изотоп $^{235}_{92}U$ составляет всего 1/140 долю от более распространенного изотопа $^{238}_{92}U$.

Ядра $^{235}_{92}U$ делятся под влиянием как быстрых, так и медленных нейтронов. Ядра же $^{238}_{92}U$ могут делиться лишь под влиянием нейтронов с энергией более 1 МэВ. Такую энергию имеют примерно 60% нейтронов, появляющихся при делении. Однако примерно лишь один нейтрон из пяти производит деление $^{238}_{92}U$. Остальные нейтроны захватываются этим изотопом, не производя деления. В результате цепная реакция с использованием чистого изотопа $^{238}_{92}U$ невозможна.

Коэффициент размножения нейтронов. Для течения цепной реакции нет необходимости, чтобы каждый нейтрон обязательно вызывал деление ядра. Необходимо лишь, чтобы среднее число освобожденных нейтронов в данной массе урана не уменьшалось с течением времени.

Это условие будет выполнено, если *коэффициент размножения нейтронов k* больше или равен единице. **Коэффициентом размножения нейтронов** называют отношение числа нейтронов в каком-либо «поколении» к числу нейтронов предшествующего «поколения». Под сменой «поколений» понимают деление ядер, при котором поглощаются нейтроны старого «поколения» и рождаются новые нейтроны.

Если $k \geqslant 1$, то число нейтронов увеличивается с течением времени или остается постоянным, и цепная реакция идет. При $k < 1$ число нейтронов убывает и цепная реакция невозможна.

Коэффициент размножения определяется четырьмя факторами:

1) захватом медленных нейтронов ядрами $^{235}_{92}U$ с последующим делением и захватом быстрых нейтронов ядрами $^{235}_{92}U$ и $^{238}_{92}U$ также с последующим делением;

2) захватом нейтронов ядрами урана без деления;

3) захватом нейтронов продуктами деления, замедлителем (о нем сказано дальше) и конструктивными элементами установки;

4) вылетом нейтронов из делящегося вещества наружу.

Лишь первый процесс сопровождается увеличением числа нейтронов (в основном за счет деления $^{235}_{92}U$). Все остальные приводят к их убыли. Цепная реакция в чистом изотопе $^{238}_{92}U$ невозможна, так как в этом случае $k < 1$ (число нейтронов, поглощаемых ядрами без деления, больше числа нейтронов, вновь образующихся за счет деления ядер).

Для стационарного течения цепной реакции коэффициент размножения нейтронов должен быть равен единице. Это равенство необходимо поддерживать с большой точностью. Уже при $k = 1,01$ почти мгновенно произойдет взрыв.

Образование плутония. Важное значение имеет не вызывающий деления захват нейтронов ядрами изотопа урана $^{238}_{92}U$. После захвата образуется радиоактивный изотоп $^{239}_{92}U$ с периодом полураспада 23 мин. Распад происходит с испусканием электрона и антинейтрино (см. с. 298) и возникновением первого трансуранового элемента — *нептуния*:

$$^{239}_{92}U \rightarrow {}^{239}_{93}Np + {}^{0}_{-1}e + {}^{0}_{0}\tilde{\nu}_e.$$

Нептуний β-радиоактивен с периодом полураспада около двух дней. В процессе распада нептуния образуется следующий трансурановый элемент — *плутоний*:

$$^{239}_{93}Np \rightarrow {}^{239}_{94}Pu + {}^{0}_{-1}e + {}^{0}_{0}\tilde{\nu}_e.$$

Плутоний относительно стабилен, так как его период полураспада велик — порядка 24 000 лет. Важнейшее свойство плутония состоит в том, что он делится под влиянием медленных нейтронов, так же как и изотоп $^{235}_{92}U$. Поэтому с помощью плутония также может быть осуществлена цепная реакция, которая сопровождается выделением громадной энергии.

Цепная реакция деления возможна благодаря тому, что при делении ядер испускается два-три нейтрона. Бо́льшая часть выделяемой энергии приходится на кинетическую энергию осколков делящихся ядер.



1. От чего зависит коэффициент размножения нейтронов?
2. Какие изотопы урана используются для осуществления цепной ядерной реакции?

§ 109 ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР

Ядерным реактором называется устройство, в котором осуществляется управляемая реакция деления ядер.

Ядра урана, особенно ядра изотопа $^{235}_{92}U$, наиболее эффективно захватывают медленные нейтроны. Вероятность захвата медленных нейтронов с последующим делением ядер в сотни раз больше, чем быстрых. Поэтому в ядерных реакторах, работающих на естественном уране, используются замедлители нейтронов для повышения коэффициента размножения нейтронов. Процессы в ядерном реакторе схематически изображены на рисунке 13.15.

Рис. 13.15

Основные элементы ядерного реактора. На рисунке 13.16 приведена схема энергетической установки с ядерным реактором.

Основными элементами ядерного реактора являются: ядерное горючее ($^{235}_{92}U$, $^{239}_{94}Pu$ и др.), замедлитель нейтронов (тяжелая или обычная вода, графит и др.), теплоноситель для вывода энергии, образующейся при работе реактора (вода, жидкий натрий и др.), и устройство для регулирования скорости реакции (вводимые в рабочее пространство реактора стержни, содержащие кадмий или бор — вещества, которые хорошо поглощают нейтроны). Снаружи реак-

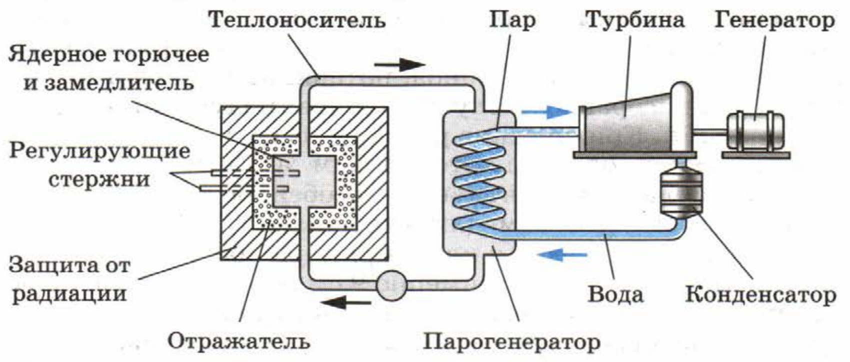
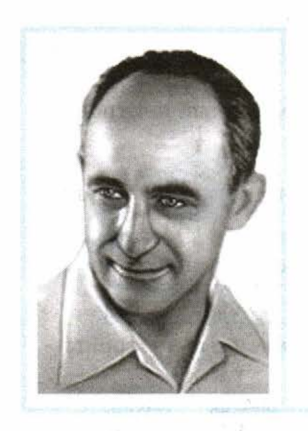


Рис. 13.16



Ферми Энрико (1901—1954) — великий итальянский физик, внесший большой вклад в развитие современной теоретической и экспериментальной физики. В 1938 г. эмигрировал в США. Одновременно с Дираком создал квантовую статистическую теорию электронов и других частиц (статистика Ферми — Дирака). Разработал количественную теорию β-распада — прототип современной квантовой теории взаимодействия элементарных частиц. Сделал ряд фундаментальных открытий в нейтронной физике. Под его руководством в 1942 г. впервые была осуществлена управляемая ядерная реакция.

тор окружают защитной оболочкой, задерживающей γ-излучение и нейтроны. Оболочку делают из бетона с железным заполнителем.

Лучшим замедлителем является *тяжелая вода* (см. § 102). Обычная вода сама захватывает нейтроны и превращается в тяжелую воду. Хорошим замедлителем считается также графит, ядра которого не поглощают нейтроны.

Критическая масса. Коэффициент размножения k может стать равным единице лишь при условии, что размеры реактора и соответственно масса урана превышают некоторые критические значения. **Критической массой** называют наименьшую массу делящегося вещества, при которой еще может протекать цепная ядерная реакция.

При малых размерах слишком велика утечка нейтронов через поверхность активной зоны реактора (объем, в котором располагаются стержни с ураном).

С увеличением размеров системы число ядер, участвующих в делении, растет пропорционально объему, а число нейтронов, теряемых вследствие утечки, увеличивается пропорционально площади поверхности. Поэтому, увеличивая размеры системы, можно достичь значения коэффициента размножения $k \approx 1$. Система будет иметь критические размеры, если число нейтронов, потерянных вследствие захвата и утечки, равно числу нейтронов, полученных в процессе деления. Критические размеры и соответственно критическая масса определяются типом ядерного горючего, замедлителем и конструктивными особенностями реактора.

Для чистого (без замедлителя) урана $^{235}_{92}U$, имеющего форму шара, критическая масса примерно равна 50 кг. При этом радиус шара равен примерно 9 см (уран очень тяжелое вещество). Применяя замедлители нейтронов и отражающую нейтроны оболочку из бериллия, удалось снизить критическую массу до 250 г.

Курчатов Игорь Васильевич (1903—1960) — советский физик и организатор научных исследований, трижды Герой Социалистического Труда. В 1943 г. возглавлял научные работы, связанные с атомной проблемой. Под его руководством были созданы первый в Европе атомный реактор (1946) и первая советская атомная бомба (1949). Ранние работы относятся к исследованию сегнетоэлектриков, ядерных реакций, вызываемых нейтронами, искусственной радиоактивности. Открыл существование возбужденных состояний ядер с относительно большим «временем жизни».



Управление реактором осуществляется при помощи стержней, содержащих кадмий или бор. При выдвинутых из активной зоны реактора стержнях $k > 1$, а при полностью вдвинутых стержнях $k < 1$. Вдвигая стержни внутрь активной зоны, можно в любой момент времени приостановить развитие цепной реакции. Управление ядерными реакторами осуществляется дистанционно с помощью ЭВМ.

Реакторы на быстрых нейтронах. Построены реакторы, работающие без замедлителя на быстрых нейтронах. Так как вероятность деления, вызванного быстрыми нейтронами, мала, то такие реакторы не могут работать на естественном уране.

Реакцию можно поддерживать лишь в обогащенной смеси, содержащей не менее 15% изотопа $^{235}_{92}U$. Преимущество реакторов на быстрых нейтронах в том, что при их работе образуется значительное количество плутония, который затем можно использовать в качестве ядерного топлива. Эти реакторы называются *реакторами-размножителями*, так как они воспроизводят делящийся материал. Строятся реакторы с *коэффициентом воспроизводства* до 1,5. Это значит, что в реакторе при делении 1 кг изотопа $^{235}_{92}U$ получается до 1,5 кг плутония. В обычных реакторах коэффициент воспроизводства 0,6—0,7.

Первые ядерные реакторы. Впервые цепная ядерная реакция деления урана была осуществлена в США коллективом ученых под руководством Энрико Ферми в декабре 1942 г.

В нашей стране первый ядерный реактор был запущен 25 декабря 1946 г. коллективом физиков, который возглавлял наш замечательный ученый Игорь Васильевич Курчатов. В настоящее время созданы различные типы реакторов, отличающихся друг от друга как по мощности, так и по своему назначению.

В ядерных реакторах, кроме ядерного горючего, имеются замедлитель нейтронов и управляющие стержни. Выделяемая энергия отводится теплоносителем.



1. Что такое критическая масса?
2. Для чего в атомном реакторе используется замедлитель нейтронов?

§ 110 ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Масса покоя ядра урана больше суммы масс покоя осколков, на которые делится ядро. Для легких ядер дело обстоит как раз наоборот. Так, масса покоя ядра гелия значительно меньше суммы масс покоя двух ядер тяжелого водорода, на которые можно разделить ядро гелия.

Это означает, что при слиянии легких ядер масса покоя уменьшается и, следовательно, должна выделяться значительная энергия. Подобного рода реакции слияния легких ядер могут протекать только при очень высоких температурах. Поэтому они называются термоядерными.

Термоядерные реакции — это реакции слияния легких ядер при очень высокой температуре.

Для слияния ядер необходимо, чтобы они сблизились на расстояние около 10^{-12} см, т. е. чтобы они попали в сферу действия ядерных сил. Этому сближению препятствует кулоновское отталкивание ядер, которое может быть преодолено лишь за счет большой кинетической энергии теплового движения ядер.

Энергия, которая выделяется при термоядерных реакциях в расчете на один нуклон, превышает удельную энергию, выделяющуюся при цепных реакциях деления ядер. Так, при слиянии тяжелого водорода — дейтерия — со сверхтяжелым изотопом водорода — тритием — выделяется около 3,5 МэВ на один нуклон. При делении же урана выделяется примерно 1 МэВ энергии на один нуклон.

Термоядерные реакции играют большую роль в эволюции Вселенной. Энергия излучения Солнца и звезд имеет термоядерное происхождение. По современным представлениям, на ранней стадии развития звезда в основном состоит из водорода. Температура внутри звезды столь велика, что в ней протекают реакции слияния ядер водорода с образованием гелия. Затем при слиянии ядер гелия образуются и более тяжелые элементы.

Термоядерные реакции играют решающую роль в эволюции химического состава вещества во Вселенной. Все эти реакции сопровождаются выделением энергии, обеспечивающей излучение света звездами на протяжении миллиардов лет.

Осуществление управляемых термоядерных реакций на Земле сулит человечеству новый, практически неисчерпаемый источник энергии. Наиболее перспективной в этом отношении реакцией является реакция слияния дейтерия с тритием:

$$^{2}_{1}\text{H} + ^{3}_{1}\text{H} \rightarrow ^{4}_{2}\text{He} + ^{0}_{1}n.$$

В этой реакции выделяется энергия 17,6 МэВ. Поскольку трития в природе нет, он должен вырабатываться в самом термоядерном реакторе из лития.

Экономически выгодная реакция, как показывают расчеты, может идти только при нагревании реагирующих веществ до температуры порядка сотен миллионов кельвин при большой плотности вещества (10^{14}—10^{15} частиц в 1 см^3). Такие температуры могут быть в принципе достигнуты путем создания в плазме мощных электрических разрядов. Основная трудность на этом пути состоит в том, чтобы удержать плазму столь высокой температуры внутри установки в течение 0,1—1 с.

Никакие стенки из вещества здесь не годятся, так как при столь высокой температуре они сразу же превратятся в пар. Единственно возможным является метод удержания высокотемпературной плазмы в ограниченном объеме с помощью очень сильных магнитных полей. Однако до сих пор решить эту задачу не удалось из-за неустойчивости плазмы. Неустойчивость приводит к диффузии части заряженных частиц сквозь магнитные стенки.

Для уменьшения неоднородности магнитного поля, приводящей к изменению конфигурации плазменного столба и соответственно к его неустойчивости, академиками А. Д. Сахаровым и И. Е. Таммом была предложена форма плазменного столба в виде тора, которая используется на установке, называемой «Токамак».

На этой установке удалось получить плазму температурой $1{,}3 \cdot 10^7$ К. Однако проблема ее удержания еще не решена.

Помимо энергетического преимущества, при термоядерных реакциях не образуются радиоактивные отходы, т. е. не надо решать проблемы загрязнения окружающей среды.

В настоящее время существует уверенность в том, что рано или поздно термоядерные реакторы будут созданы.

Ученые нашей страны достигли больших успехов в создании управляемых термоядерных реакций. Эти работы были начаты под руководством академиков Л. А. Арцимовича и М. А. Леонтовича и продолжаются их учениками.

Пока же удалось осуществить лишь *неуправляемую реакцию* синтеза взрывного типа в водородной (или термоядерной) бомбе.

Осуществление управляемых термоядерных реакций способно решить энергетическую проблему человечества. Неуправляемые термоядерные реакции в водородных бомбах могут человечество уничтожить.



1. Почему реакция слияния легких ядер происходит только при очень высоких температурах?

2. Как объяснить с точки зрения закона сохранения энергии, что энергия выделяется как при делении тяжелых ядер, так и при слиянии легких ядер?

§ 111 ПРИМЕНЕНИЕ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ

Применение ядерной энергии для преобразования ее в электрическую впервые было осуществлено в нашей стране в 1954 г. В г. Обнинске была введена в действие первая атомная электростанция (АЭС) мощностью 5000 кВт. Энергия, выделяющаяся в ядерном реакторе, использовалась для превращения воды в пар, который вращал затем связанную с генератором турбину.

Развитие ядерной энергетики. По такому же принципу действуют введенные в эксплуатацию Нововоронежская, Ленинградская, Курская, Кольская и другие АЭС. Реакторы этих станций имеют мощность 500—1000 МВт.

Атомные электростанции строятся прежде всего в европейской части страны. Это связано с преимуществами АЭС по сравнению с тепловыми электростанциями, работающими на органическом топливе. Ядерные реакторы не потребляют дефицитного органического топлива и не загружают перевозками угля железнодорожный транспорт. Атомные электростанции не потребляют атмосферный кислород и не засоряют среду золой и продуктами сгорания. Однако размещение АЭС в густонаселенных областях таит в себе потенциальную угрозу.

В реакторах на тепловых (т. е. медленных) нейтронах уран используется лишь на 1—2%. Полное использование урана достигается в реакторах на быстрых нейтронах, в которых обеспечивается также воспроизводство нового ядер-

ного горючего в виде плутония. В 1980 г. на Белоярской АЭС состоялся пуск первого в мире реактора на быстрых нейтронах мощностью 600 МВт.

Ядерной энергетике, как и многим другим отраслям промышленности, присущи вредные или опасные факторы воздействия на окружающую среду. Наибольшую потенциальную опасность представляет радиоактивное загрязнение. Сложные проблемы возникают с захоронением радиоактивных отходов и демонтажем отслуживших свой срок атомных электростанций. Срок их службы около 20 лет, после чего восстановление станций из-за многолетнего воздействия радиации на материалы конструкций невозможно.

АЭС проектируется с расчетом на максимальную безопасность персонала станции и населения. Опыт эксплуатации АЭС во всем мире показывает, что биосфера надежно защищена от радиационного воздействия предприятий ядерной энергетики в нормальном режиме эксплуатации. Однако взрыв четвертого реактора на Чернобыльской АЭС показал, что риск разрушения активной зоны реактора из-за ошибок персонала и просчетов в конструкции реакторов остается реальностью, поэтому принимаются строжайшие меры для снижения этого риска.

Ядерные реакторы устанавливаются также на атомных подводных лодках и ледоколах.

Ядерное оружие. Неуправляемая цепная реакция с большим коэффициентом увеличения нейтронов осуществляется в атомной бомбе.

Для того чтобы происходило почти мгновенное выделение энергии (взрыв), реакция должна идти на быстрых нейтронах (без применения замедлителей). Взрывчатым веществом служит чистый уран $^{235}_{92}U$ или плутоний $^{239}_{94}Pu$.

Чтобы мог произойти взрыв, размеры делящегося материала должны превышать критические. Это достигается либо путем быстрого соединения двух кусков делящегося материала с докритическими размерами, либо же за счет резкого сжатия одного куска до размеров, при которых утечка нейтронов через поверхность падает настолько, что размеры куска оказываются надкритическими. То и другое осуществляется с помощью обычных взрывчатых веществ.

При взрыве атомной бомбы температура достигает десятков миллионов кельвин. При такой высокой температуре очень резко повышается давление и образуется мощная взрывная волна. Одновременно возникает мощное излучение. Продукты цепной реакции при взрыве атомной бомбы сильно радиоактивны и опасны для жизни живых организмов.

Атомные бомбы применили США в конце Второй мировой войны против Японии. В 1945 г. были сброшены атомные бомбы на японские города Хиросима и Нагасаки.

В термоядерной (водородной) бомбе для инициирования реакции синтеза используется взрыв атомной бомбы, помещенной внутри термоядерной.

Нетривиальным решением оказалось то, что взрыв атомной бомбы используется не для повышения температуры, а для сильнейшего сжатия термоядерного топлива излучением, образующимся при взрыве атомной бомбы.

В нашей стране основные идеи создания термоядерной бомбы были выдвинуты после Великой Отечественной войны А. Д. Сахаровым.

С созданием ядерного оружия победа в войне стала невозможной. Ядерная война способна привести человечество к гибели, поэтому народы всего мира настойчиво борются за запрещение ядерного оружия.

---

§ 112 ПОЛУЧЕНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

В атомной индустрии всевозрастающую ценность для человечества представляют радиоактивные изотопы.

Элементы, не существующие в природе. С помощью ядерных реакций можно получить радиоактивные изотопы всех химических элементов, встречающихся в природе только в стабильном состоянии. Элементы под номерами 43, 61, 85 и 87 вообще не имеют стабильных изотопов и впервые получены искусственно. Так, например, элемент с порядковым номером $Z = 43$, названный технецием, имеет самый долгоживущий изотоп с периодом полураспада около миллиона лет.

С помощью ядерных реакций получены также *трансурановые элементы*. О нептунии и плутонии вы уже знаете. Кроме них, получены еще следующие элементы: *америций* ($Z = 95$), *кюрий* ($Z = 96$), *берклий* ($Z = 97$), *калифорний* ($Z = 98$), *эйнштейний* ($Z = 99$), *фермий* ($Z = 100$), *менделевий* ($Z = 101$), *нобелий* ($Z = 102$), *лоуренсий* ($Z = 103$), *резерфордий* ($Z = 104$), *дубний* ($Z = 105$), *сиборгий* ($Z = 106$), *борий* ($Z = 107$), *хассий* ($Z = 108$), *мейтнерий* ($Z = 109$), а также элементы под номерами 110, 111 и 112, не имеющие пока общепризнанных названий. Элементы, начиная с номера 104, впервые синтезированы либо в подмосковной Дубне, либо в Германии.

Меченые атомы. В настоящее время как в науке, так и в производстве все более широко используются радиоактивные изотопы различных химических элементов. Наибольшее применение имеет метод *меченых атомов*.

Метод основан на том, что химические свойства радиоактивных изотопов не отличаются от свойств нерадиоактивных изотопов тех же элементов.

Обнаружить радиоактивные изотопы можно очень просто — по их излучению. Радиоактивность является своеобразной меткой, с помощью которой можно проследить за поведением элемента при различных химических реакциях и физических превращениях веществ. Метод меченых атомов стал одним из наиболее действенных методов при решении многочисленных проблем биологии, физиологии, медицины и т. д.

Радиоактивные изотопы — источники излучений. Радиоактивные изотопы широко применяются в науке, медицине и технике как компактные источники γ-лучей. Главным образом используется радиоактивный кобальт $^{60}_{27}Co$.

Получение радиоактивных изотопов. Получают радиоактивные изотопы в атомных реакторах и на ускорителях элементарных частиц. В настоящее время производством изотопов занята большая отрасль промышленности.

Радиоактивные изотопы в биологии и медицине. Одним из наиболее выдающихся исследований, проведенных с помощью меченых атомов, явилось исследование обмена веществ в организмах. Было доказано, что за сравнительно небольшое время организм подвергается почти полному обновлению. Слагающие его атомы заменяются новыми.

Лишь железо, как показали опыты по изотопному исследованию крови, является исключением из этого правила. Железо входит в состав гемоглобина красных кровяных шариков. При введении в пищу радиоактивных атомов железа $^{59}_{26}Fe$ было обнаружено, что они почти не поступают в кровь. Только в том случае, когда запасы железа в организме иссякают, железо начинает усваиваться организмом.

Если не существует достаточно долго живущих радиоактивных изотопов, как, например, у кислорода и азота, меняют изотопный состав стабильных элементов. Так, добавлением к кислороду избытка изотопа $^{18}_{8}O$ было установлено, что свободный кислород, выделяющийся при фотосинтезе, первоначально входил в состав воды, а не углекислого газа.

Радиоактивные изотопы применяются в медицине как для постановки диагноза, так и для терапевтических целей.

Радиоактивный натрий, вводимый в небольших количествах в кровь, используется для исследования кровообращения.

Иод интенсивно отлагается в щитовидной железе, особенно при базедовой болезни. Наблюдая с помощью счетчика за отложением радиоактивного иода, можно быстро поставить диагноз. Большие дозы радиоактивного иода вызывают частичное разрушение аномально развивающихся тканей, и поэтому радиоактивный иод используют для лечения базедовой болезни.

Интенсивное γ-излучение кобальта используется при лечении раковых заболеваний (кобальтовая пушка).

Радиоактивные изотопы в промышленности. Не менее обширна область применения радиоактивных изотопов в промышленности. Одним из примеров может служить способ контроля износа поршневых колец в двигателях внутреннего сгорания. Облучая поршневое кольцо нейтронами, вызывают в нем ядерные реакции и делают его радиоактивным. При работе двигателя частички материала кольца попадают в смазочное масло. Исследуя уровень радиоактивности масла после определенного времени работы двигателя, определяют износ кольца.

Радиоактивные изотопы позволяют судить о диффузии металлов, процессах в доменных печах и т. д. Мощное γ-излучение радиоактивных препаратов используют для исследования внутренней структуры металлических отливок с целью обнаружения в них дефектов.

Радиоактивные изотопы в сельском хозяйстве. Все более широкое применение получают радиоактивные изотопы в сельском хозяйстве. Облучение семян растений (хлопчатника, капусты, редиса и др.) небольшими дозами γ-лучей от радиоактивных препаратов приводит к заметному повышению урожайности.

Большие дозы радиации вызывают мутации у растений и микроорганизмов, что в отдельных случаях приводит к появлению мутантов с новыми ценными свойствами (радиоселекция). Так выведены ценные сорта пшеницы, фасоли и других культур, а также получены высокопродуктивные микроорганизмы, применяемые в производстве антибиотиков. Гамма-излучение радиоактивных изотопов используется также для борьбы с вредными насекомыми и для консервации пищевых продуктов.

Широкое применение получили меченые атомы в агротехнике. Например, чтобы выяснить, какое из фосфорных удобрений лучше усваивается растением, помечают различные удобрения радиоактивным фосфором $^{32}_{15}P$. Исследуя за-

тем растения на радиоактивность, можно определить количество усвоенного ими фосфора из разных сортов удобрения.

Радиоактивные изотопы в археологии. Интересное применение для определения возраста древних предметов органического происхождения (дерева, древесного угля, тканей и т. д.) получил метод радиоактивного углерода. В растениях всегда имеется β-радиоактивный изотоп углерода $^{14}_{6}C$ с периодом полураспада $T = 5700$ лет. Он образуется в атмосфере Земли в небольшом количестве из азота под действием нейтронов. Последние же возникают за счет ядерных реакций, вызванных быстрыми частицами, которые поступают в атмосферу из космоса (космические лучи).

Соединяясь с кислородом, этот изотоп углерода образует углекислый газ, поглощаемый растениями, а через них и животными. Один грамм углерода из образцов молодого леса испускает около пятнадцати β-частиц в секунду.

После гибели организма пополнение его радиоактивным углеродом прекращается. Имеющееся же количество этого изотопа убывает за счет радиоактивности. Определяя процентное содержание радиоактивного углерода в органических остатках, можно определить их возраст, если он лежит в пределах от 1000 до 50 000 и даже до 100 000 лет. Таким методом узнают возраст египетских мумий, остатков доисторических костров и т. д.

Радиоактивные изотопы широко применяются в биологии, медицине, промышленности, сельском хозяйстве и даже в археологии.



Что такое радиоактивные изотопы и как их используют?

§ 113 БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Излучения радиоактивных веществ оказывают очень сильное воздействие на все живые организмы. Даже сравнительно слабое излучение, которое при полном поглощении повышает температуру тела лишь на 0,001 °С, нарушает жизнедеятельность клеток.

Живая клетка — это сложный механизм, не способный продолжать нормальную деятельность даже при малых повреждениях отдельных его участков. Между тем и слабые излучения способны нанести клеткам существенные повреждения и вызвать опасные заболевания (лучевая болезнь).

При большой интенсивности излучения живые организмы погибают. Опасность излучений усугубляется тем, что они не вызывают никаких болевых ощущений даже при смертельных дозах.

Механизм биологического действия излучения, поражающего объекты, еще недостаточно изучен. Но ясно, что оно сводится к ионизации атомов и молекул и это приводит к изменению их химической активности. Наиболее чувствительны к излучениям ядра клеток, особенно клеток, которые быстро делятся. Поэтому в первую очередь излучения поражают костный мозг, из-за чего нарушается процесс образования крови. Далее наступает поражение клеток пищеварительного тракта и других органов.

Сильное влияние оказывает облучение на наследственность, поражая гены в хромосомах. В большинстве случаев это влияние является неблагоприятным.

Облучение живых организмов может оказывать и определенную пользу. Быстроразмножающиеся клетки в злокачественных (раковых) опухолях более чувствительны к облучению, чем нормальные. На этом основано подавление раковой опухоли γ-лучами радиоактивных препаратов, которые для этой цели более эффективны, чем рентгеновские лучи.

Доза излучения. Воздействие излучений на живые организмы характеризуется *дозой излучения*. **Поглощенной дозой излучения** называется отношение поглощенной энергии E ионизирующего излучения к массе m облучаемого вещества:

$$D = \frac{E}{m}. \qquad (13.6)$$

В СИ поглощенную дозу излучения выражают в *грэях* (сокращенно: Гр). 1 Гр *равен поглощенной дозе излучения, при которой облученному веществу массой* 1 кг *передается энергия ионизирующего излучения* 1 Дж:

$$1 \text{ Гр} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

Естественный фон радиации (космические лучи, радиоактивность окружающей среды и человеческого тела) составляет за год дозу излучения около $2 \cdot 10^{-3}$ Гр на человека. Международная комиссия по радиационной защите установила для лиц, работающих с излучением, предельно допустимую за год дозу 0,05 Гр. Доза излучения 3—10 Гр, полученная за короткое время, смертельна.

Рентген. На практике широко используется внесистемная единица экспозиционной дозы излучения — *рентген*

(сокращенно: Р). Эта единица является мерой ионизирующей способности рентгеновского и гамма-излучений. Доза излучения равна одному рентгену (1 Р), если в 1 $см^3$ сухого воздуха при температуре 0 °С и давлении 760 мм рт. ст. образуется столько ионов, что их суммарный заряд каждого знака в отдельности равен $3 \cdot 10^{-10}$ Кл. При этом получается примерно $2 \cdot 10^9$ пар ионов. Число образующихся ионов связано с поглощаемой веществом энергией. В практической дозиметрии можно считать 1 Р примерно эквивалентным поглощенной дозе излучения 0,01 Гр.

Характер воздействия излучения зависит не только от дозы поглощенного излучения, но и от его вида. Различие биологического воздействия видов излучения характеризуется *коэффициентом качества* k. За единицу принимается коэффициент качества рентгеновского и гамма-излучения.

Самое большое значение коэффициента качества у α-частиц ($k = 20$), α-лучи являются самыми опасными, так как вызывают самые большие разрушения живых клеток.

Для оценки действия излучения на живые организмы вводится специальная величина — **эквивалентная доза поглощенного излучения.** Это произведение дозы поглощенного излучения на коэффициент качества:

$$H = D \cdot k.$$

Единица эквивалентной дозы — *зиверт* (Зв). 1 Зв — *эквивалентная доза, при которой доза поглощенного гамма-излучения равна* 1 Гр.

Максимальное значение эквивалентной дозы, после которого происходит поражение организма, выражающееся в нарушении деления клетки или образовании новых клеток, 0,5 Зв.

Среднее значение эквивалентной дозы поглощенного излучения за счет естественного радиационного фона (космические лучи, радиоактивные изотопы земной коры и т. д.) составляет 2 мЗв в год.

Защита организмов от излучения. При работе с любым источником радиации (радиоактивные изотопы, реакторы и др.) необходимо принимать меры по радиационной защите всех людей, могущих попасть в зону действия излучения.

Самый простой метод защиты — это удаление персонала от источника излучения на достаточно большое расстояние. Даже без учета поглощения в воздухе интенсивность радиации убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от источника. Поэтому ампулы с радиоактивными препаратами не следует брать руками. Надо пользоваться специальными щипцами с длинной ручкой.

В тех случаях, когда удаление от источника излучения на достаточно большое расстояние невозможно, для защиты от излучения используют преграды из поглощающих материалов.

Наиболее сложна защита от γ-лучей и нейтронов из-за их большой проникающей способности. Лучшим поглотителем γ-лучей является свинец. Медленные нейтроны хорошо поглощаются бором и кадмием. Быстрые нейтроны предварительно замедляются с помощью графита.

После аварии на Чернобыльской АЭС Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ) по предложению нашей страны приняты рекомендации по дополнительным мерам безопасности энергетических реакторов. Установлены более строгие регламенты работ персонала АЭС.

Авария на Чернобыльской АЭС показала огромную опасность радиоактивных излучений. Все люди должны иметь представление об этой опасности и мерах защиты от нее.



1. **Что такое доза излучения?**
2. **Чему (в рентгенах) равен естественный фон радиации?**
3. **Чему (в рентгенах) равна предельно допустимая за год доза излучения для лиц, работающих с радиоактивными препаратами?**



УПРАЖНЕНИЕ 14

1. В результате последовательной серии радиоактивных распадов уран $^{238}_{92}U$ превращается в свинец $^{206}_{82}Pb$. Сколько α- и β-превращений он при этом испытывает?

2. Период полураспада радия $T = 1600$ лет. Через какое время число атомов уменьшится в 4 раза?

3. Во сколько раз уменьшится число атомов одного из изотопов радона за 1,91 сут.? Период полураспада этого изотопа радона $T = 3{,}82$ сут.

4. Пользуясь периодической системой элементов Д. И. Менделеева, определите число протонов и число нейтронов в ядрах атомов фтора, аргона, брома, цезия и золота.

5. Чему равна энергия связи ядра тяжелого водорода — дейтрона? Атомная масса ядра дейтрона $m_D = 2{,}01355$ а. е. м, протона $m_p = 1{,}00728$ а. е. м, нейтрона $m_n = 1{,}00866$ а. е. м; масса атома углерода $m_C = 1{,}995 \cdot 10^{-26}$ кг.

6. При бомбардировке ядер бора $^{11}_{5}B$ протонами получается бериллий $^{8}_{4}Be$. Какое еще ядро образуется при этой реакции?

7. В результате деления ядра урана $^{235}_{92}\mathrm{U}$, захватившего нейтрон, образуются ядра бария $^{142}_{56}\mathrm{Ba}$ и криптона $^{91}_{36}\mathrm{Kr}$, а также три свободных нейтрона. Удельная энергия связи ядер бария 8,38 МэВ/нуклон, криптона 8,55 МэВ/нуклон и урана 7,59 МэВ/нуклон. Чему равна энергия, выделяющаяся при делении одного ядра урана?

КРАТКИЕ ИТОГИ ГЛАВЫ 13

1. В ядерной физике изучаются структура и превращения ядер. Для регистрации и изучения столкновений и взаимных превращений атомных ядер и элементарных частиц используют специальные устройства. К их числу относятся счетчик Гейгера, камера Вильсона, пузырьковая камера, фотоэмульсии.
2. В конце XIX в. А. Беккерель открыл явление радиоактивности. Радиоактивность — явление самопроизвольного превращения одних ядер в другие, сопровождающееся испусканием различных частиц. Такие химические элементы, как уран, торий и др., самопроизвольно (без внешних воздействий) излучают α-, β- и γ-лучи. Природа этих лучей различна: γ-лучи — это электромагнитные волны малой длины волны (10^{-10}—10^{-13} м), β-лучи — это поток электронов, а α-лучи представляют собой поток ядер атомов гелия.
3. Э. Резерфорд установил, что радиоактивный распад есть самопроизвольное превращение атомных ядер, сопровождающееся испусканием различных частиц. Согласно закону радиоактивного распада для каждого радиоактивного вещества существует определенный интервал времени, на протяжении которого его активность убывает в два раза. Этот интервал времени называют периодом полураспада. В зависимости от вещества период полураспада меняется в широких пределах: от миллиардов лет до долей секунды.
4. Резерфорд впервые произвел искусственное превращение атомных ядер, бомбардируя их α-частицами, испускаемыми радиоактивными веществами. Д. Чедвик с помощью подобных опытов открыл новую элементарную частицу — нейтрон. Заряд нейтрона равен нулю, а масса примерно равна массе протона (лишь незначительно превышая ее).
5. В. Гейзенберг и Д. Д. Иваненко предложили протонно-нейтронную модель атомного ядра. Согласно этой модели ядро состоит из протонов и нейтронов. Массовое число ядра A равно сумме числа протонов Z и числа нейтронов N:

$$A = Z + N.$$

6. Ядра с одним и тем же числом протонов Z, но с разным числом нейтронов N называются изотопами. Их химические свойства тождественны.
7. Протоны и нейтроны удерживаются внутри ядра мощными короткодействующими силами. Эти силы называются ядерными.
8. Важнейшим для всей ядерной физики является понятие энергии связи. Энергия связи $E_{св}$ равна той энергии, которую необходимо затратить, чтобы расщепить ядро на составляющие его нуклоны. Энергия связи ядер в миллионы раз превышает энергию ионизации атомов.
9. Изменения ядер при их взаимодействии друг с другом (или с элементарными частицами) называют ядерными реакциями. При ядерных реакциях происходит выделение или поглощение энергии.

   Большинство ядерных реакций наблюдается при столкновении ядер с заряженными элементарными частицами или легкими ядрами большой энергии. Такую энергию они приобретают в ускорителях элементарных частиц или ионов. Нейтроны не отталкиваются ядрами и поэтому могут вызывать ядерные реакции при небольших энергиях.
10. Ядра урана, тория и других тяжелых элементов способны делиться под влиянием нейтронов. При этом выделяется энергия порядка 200 МэВ. При делении ядра испускается два-три нейтрона. Это позволяет осуществить управляемую цепную реакцию в ядерных реакторах. Неуправляемая реакция деления ядер используется в атомных бомбах.
11. При столкновениях легкие ядра могут сливаться с выделением энергии. Такие ядерные реакции могут проходить только при высоких температурах и поэтому называются термоядерными. За счет термоядерных реакций Солнце и звезды выделяют энергию на протяжении миллиардов лет. Осуществить управляемую термоядерную реакцию пока не удается.
12. В нашей стране была построена первая в мире атомная электростанция. Развивается строительство мощных атомных электростанций. После аварии на Чернобыльской АЭС приняты дополнительные меры по безопасности атомных реакторов.
13. Радиоактивные изотопы, получаемые с помощью ядерных реакторов и ускорителей частиц, находят применение в науке, медицине, сельском хозяйстве и промышленности.

14. Радиоактивные излучения представляют большую опасность для живых организмов. При работе с ними необходимо прибегать к специальным мерам защиты.

Глава 14. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

В этой главе речь пойдет о частицах, которые нельзя разделить и из которых построена вся материя.

§ 114 ТРИ ЭТАПА В РАЗВИТИИ ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Вы уже более или менее знакомы с электроном, фотоном, протоном и нейтроном. Но что же такое элементарная частица?

Этап первый. От электрона до позитрона: 1897—1932 гг. (*Элементарные частицы — «атомы Демокрита» на более глубоком уровне.*)

Когда греческий физик Демокрит назвал простейшие нерасчленимые далее частицы атомами (слово *атом*, напомним, означает «неделимый»), то ему, вероятно, все представлялось в принципе не очень сложным. Различные предметы, растения, животные состоят из неделимых, неизменных частиц. Превращения, наблюдаемые в мире, — это простая перестановка атомов. Все в мире течет, все изменяется, кроме самих атомов, которые остаются неизменными.

Но в конце XIX в. было открыто сложное строение атомов и был выделен электрон как составная часть атома. Затем, уже в XX в., были открыты протон и нейтрон — частицы, входящие в состав атомного ядра. Поначалу на все эти частицы смотрели точно так, как Демокрит смотрел на атомы: их считали неделимыми и неизменными первоначальными сущностями, основными кирпичиками мироздания.

Этап второй. От позитрона до кварков: 1932—1964 гг. (*Все элементарные частицы превращаются друг в друга.*) Ситуация привлекательной ясности длилась недолго. Все оказалось намного сложнее: как выяснилось, неизменных частиц нет совсем. В самом слове *элементарная* заключается двоякий смысл. С одной стороны, элементарный — это само собой разумеющийся, простейший. С другой стороны, под элементарным понимается нечто фундаментальное, лежащее в основе вещей (именно в этом смысле сейчас и называют *субатомные частицы* элементарными).

Считать известные сейчас элементарные частицы подобными неизменным атомам Демокрита мешает следующий

простой факт. Ни одна из частиц не бессмертна. Большинство частиц, называемых сейчас элементарными, не может прожить более двух миллионных долей секунды, даже в отсутствие какого-либо воздействия извне. Свободный нейтрон (нейтрон, находящийся вне атомного ядра) живет в среднем 15 мин.

Лишь частицы *фотон*, *электрон*, *протон* и *нейтрино* сохраняли бы свою неизменность, если бы каждая из них была одна в целом мире (нейтрино лишено электрического заряда, и его масса покоя, по-видимому, равна нулю).

Но у электронов и протонов имеются опаснейшие собратья — *позитроны* и *антипротоны*, при столкновении с которыми происходит взаимное уничтожение этих частиц и образование новых.

Фотон, испущенный настольной лампой, живет не более 10^{-8} с. Это то время, которое ему нужно, чтобы достичь страницы книги и поглотиться бумагой.

Лишь нейтрино почти бессмертны, так как они чрезвычайно слабо взаимодействуют с другими частицами. Однако и нейтрино гибнут при столкновении с другими частицами, хотя такие столкновения случаются крайне редко.

Итак, в вечном стремлении к отысканию неизменного в нашем изменчивом мире ученые оказались не на «гранитном основании», а на «зыбком песке».

Все элементарные частицы превращаются друг в друга, и эти взаимные превращения — главный факт их существования.

Превращения элементарных частиц ученые наблюдали при столкновениях частиц высоких энергий. Представления о неизменности элементарных частиц оказались несостоятельными. Но идея об их неразложимости сохранилась. Элементарные частицы уже далее неделимы, но они неисчерпаемы по своим свойствам. Вот что заставляет так думать.

Пусть у нас возникло естественное желание исследовать, состоит ли, например, электрон из каких-либо других *субэлементарных частиц*. Что нужно сделать для того, чтобы попытаться расчленить электрон? Можно придумать только один способ. Это тот же способ, к которому прибегает ребенок, если он хочет узнать, что находится внутри пластмассовой игрушки, — сильный удар.

Разумеется, по электрону нельзя ударить молотком. Для этого можно воспользоваться другим электроном, летящим с огромной скоростью, или какой-либо иной движущейся с большой скоростью элементарной частицей.

Современные ускорители сообщают заряженным частицам скорости, очень близкие к скорости света.

Что же происходит при столкновении частиц сверхвысокой энергии? Они отнюдь не дробятся на нечто такое, что можно было бы назвать их составными частями. Нет, они рождают новые частицы из числа тех, которые уже фигурируют в списке элементарных частиц. Чем больше энергия сталкивающихся частиц, тем большее количество частиц рождается. При этом возможно появление частиц с большей массой, чем сталкивающиеся частицы. Главное, что надо отметить, — это то, что всегда выполняется закон сохранения энергии.

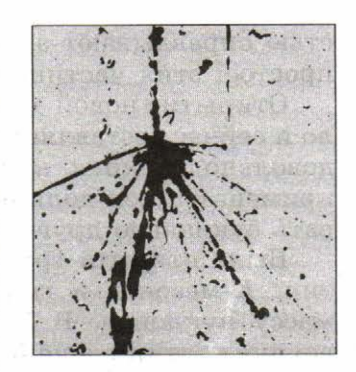


Рис. 14.1

На рисунке 14.1 вы видите результат столкновения ядра углерода, имевшего энергию 60 млрд эВ (жирная верхняя линия), с ядром серебра фотоэмульсии. Ядро раскалывается на осколки, разлетающиеся в разные стороны. Одновременно рождается много новых элементарных частиц — пионов. Подобные реакции при столкновениях релятивистских ядер, полученных в ускорителе, впервые в мире осуществлены в лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований в г. Дубне под руководством академика А. М. Балдина. Лишенные электронной оболочки ядра были получены путем ионизации атомов углерода лазерным лучом.

Возможно, конечно, что при столкновениях частиц с недоступной пока нам энергией будут рождаться и какие-то новые, еще неизвестные частицы. Но сути дела это не изменит. Рождаемые при столкновениях новые частицы никак нельзя рассматривать как составные части частиц-«родителей». Ведь «дочерние» частицы, если их ускорить, могут, не изменив своей природы, породить, в свою очередь, при столкновениях сразу несколько таких же в точности частиц, какими были их «родители», да еще и множество других частиц.

Итак, по современным представлениям, элементарные частицы — это первичные, неразложимые далее частицы, из которых построена вся материя. Однако неделимость элементарных частиц не означает, что у них отсутствует внутренняя структура.

Этап третий. От гипотезы о кварках (1964 г.) до наших дней. (*Большинство элементарных частиц имеет сложную структуру.*) В 60-е гг. возникли сомнения в том, что все частицы, называемые сейчас элементарными, полно-

стью оправдывают это название. Основание для сомнений простое: этих частиц очень много.

Открытие новой элементарной частицы всегда составляло и сейчас составляет выдающийся триумф науки. Но уже довольно давно к каждому очередному триумфу начала примешиваться доля беспокойства. Триумфы стали следовать буквально друг за другом.

Была открыта группа так называемых *странных* частиц: K-мезонов и гиперонов с массами, превышающими массу нуклонов. В 70-е гг. к ним прибавилась большая группа частиц с еще бóльшими массами, названных *очарованными*.

Кроме того, были открыты короткоживущие частицы с временем жизни порядка 10^{-22}—10^{-23} с. Эти частицы были названы *резонансами*, и их число перевалило за двести.

Вот тогда-то (в 1964 г.) М. Гелл-Манном и Дж. Цвейгом была предложена модель, согласно которой все частицы, участвующие в сильных (ядерных) взаимодействиях, — *адроны* — построены из более фундаментальных (или первичных) частиц — *кварков*.

Кварки имеют дробный электрический заряд $+\frac{2}{3}e$ и $-\frac{1}{3}e$. Протоны и нейтроны состоят из трех кварков.

В настоящее время в реальности кварков никто не сомневается, хотя в свободном состоянии они не обнаружены и, вероятно, не будут обнаружены никогда. Существование кварков доказывают опыты по рассеянию электронов очень высокой энергии на протонах и нейтронах. Число различных кварков равно шести. Кварки, насколько сейчас известно, лишены внутренней структуры и в этом смысле могут считаться истинно элементарными.

Легкие частицы, не участвующие в сильных взаимодействиях, называются *лептонами*. Их тоже шесть, как и кварков (электрон, три вида нейтрино и еще две частицы — мюон и тау-лептон с массами, значительно бóльшими массы электрона).

Кварки и лептоны — истинно элементарные частицы.

§ 115 ОТКРЫТИЕ ПОЗИТРОНА. АНТИЧАСТИЦЫ

Существование двойника электрона — позитрона — было предсказано теоретически английским физиком П. Дираком в 1931 г.

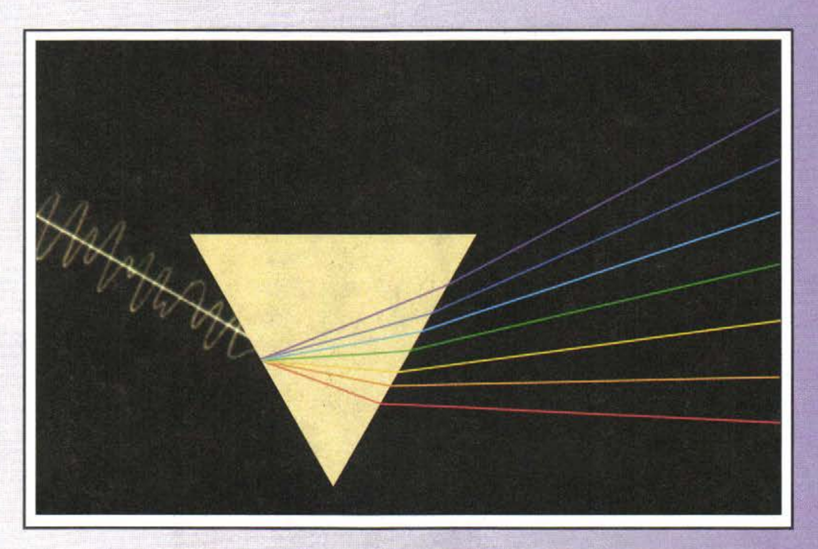


Рис. I. Схема разложения белого света с помощью призмы. Различным цветам соответствуют различные длины волн. Никакой определенной длины волны белому свету не соответствует.

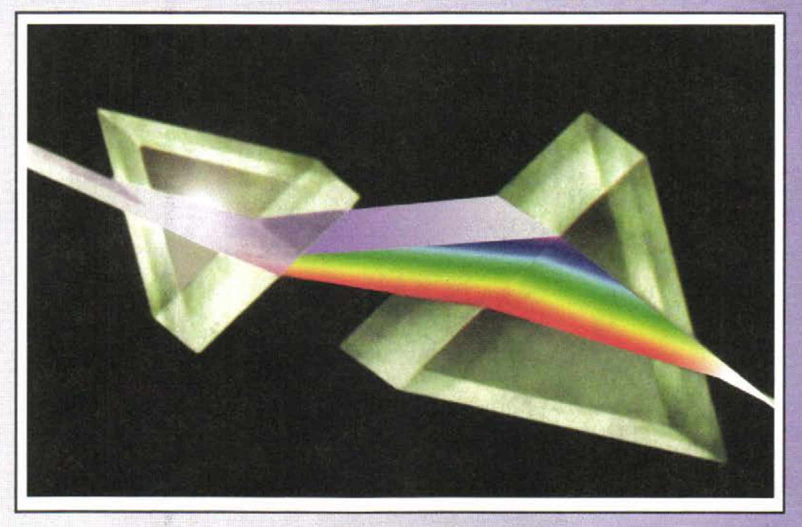


Рис. II. Разложение и синтез белого света с помощью призм.

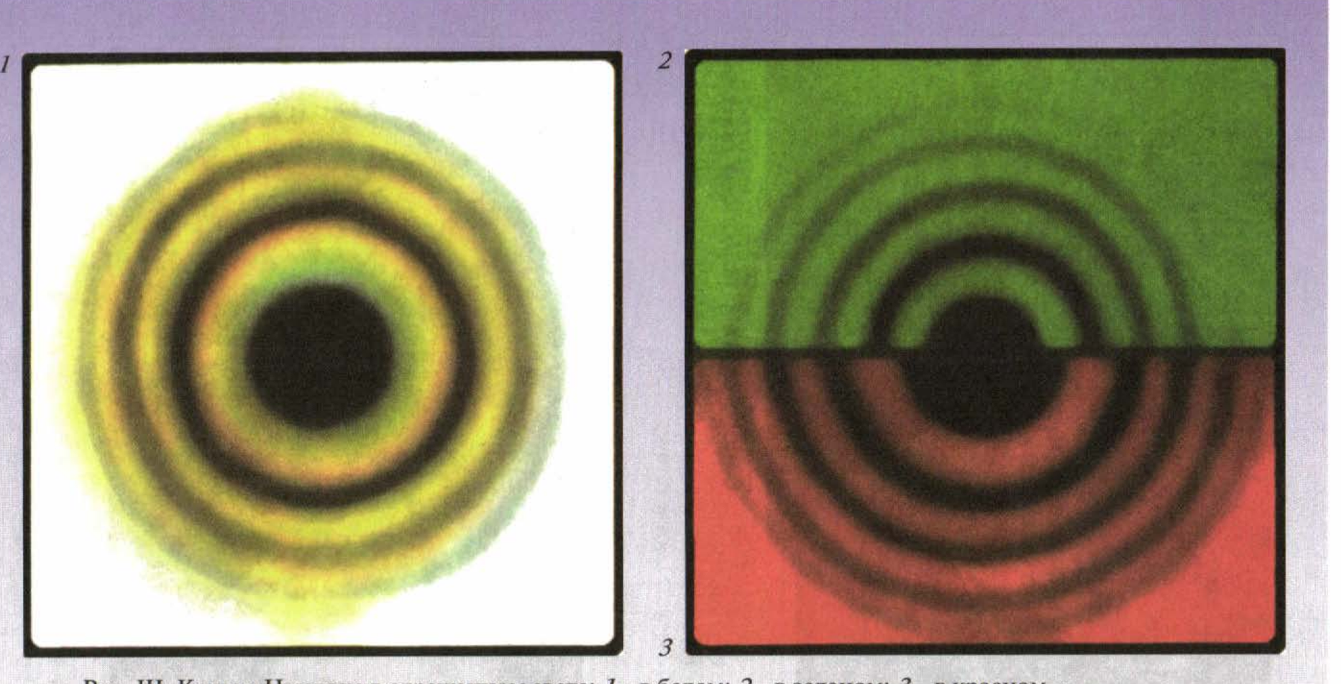


Рис. III. Кольца Ньютона в отраженном свете: *1* – в белом; *2* – в зеленом; *3* – в красном.

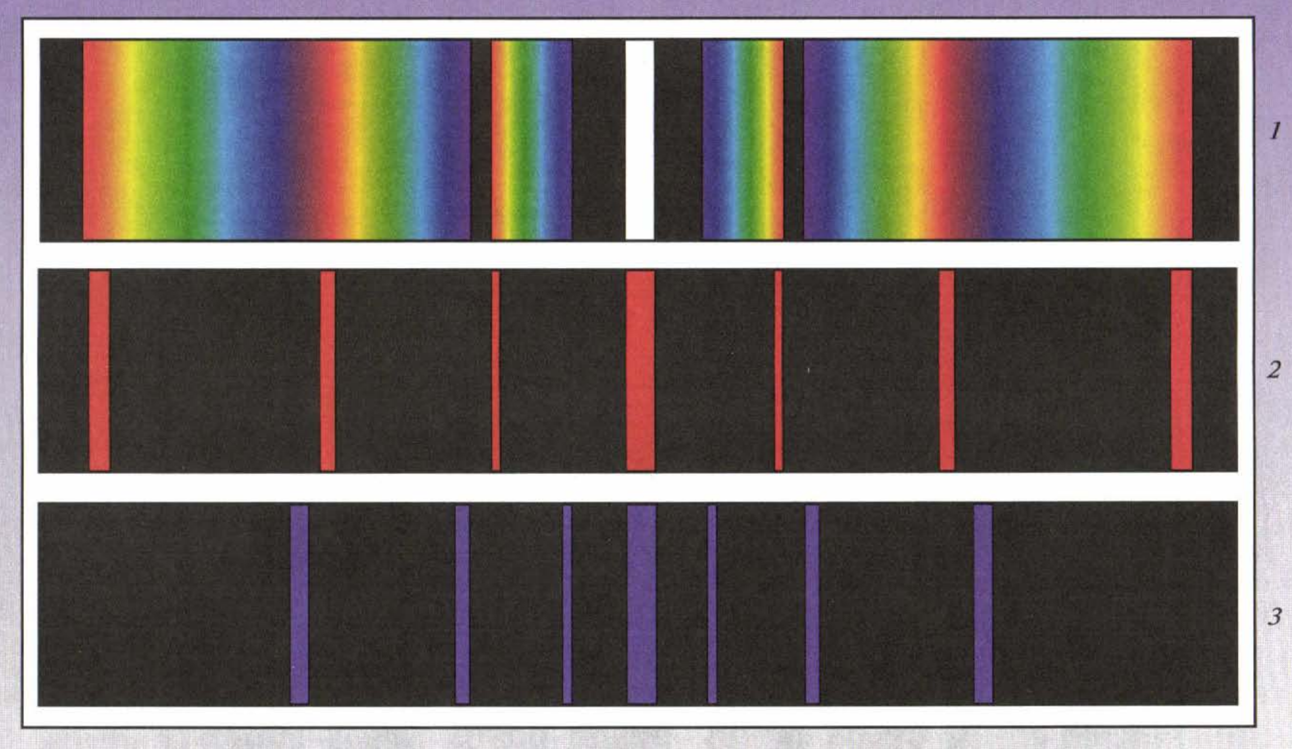


Рис. IV. Спектры, полученные с помощью дифракционной решетки: *1* – для белого света; *2* – для монохроматического красного света; *3* – для монохроматического фиолетового света.

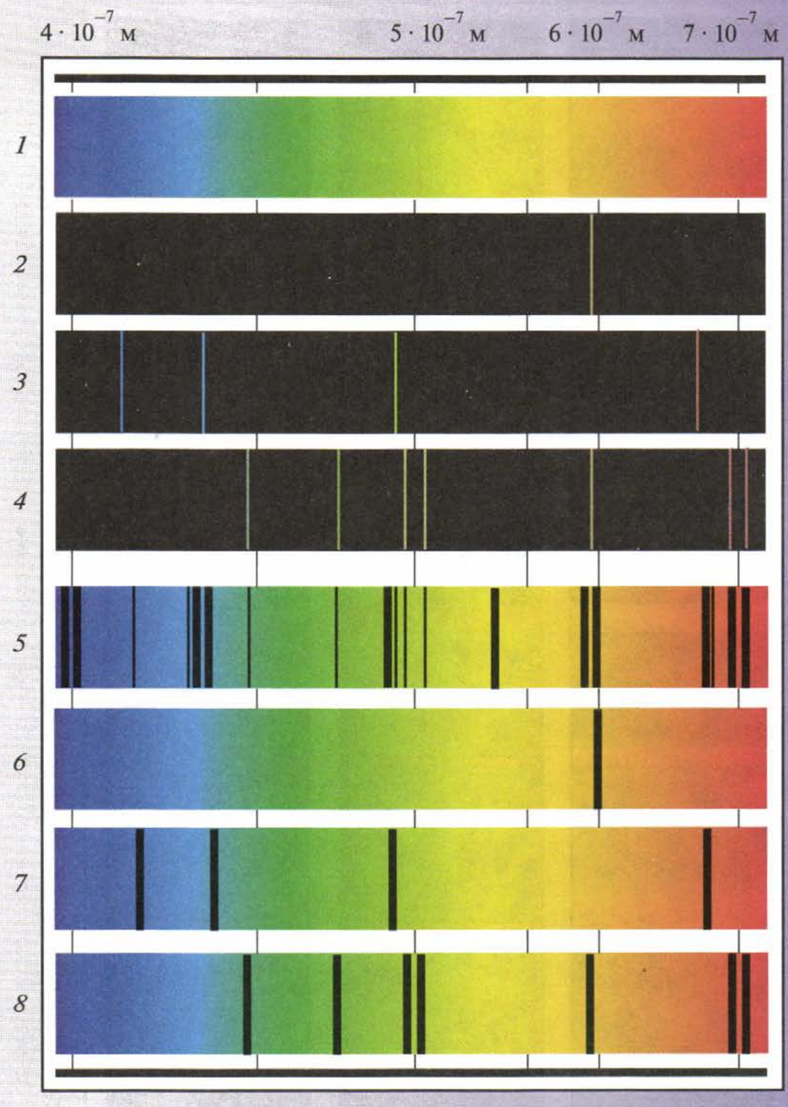


Рис. V. Спектры испускания: *1* – сплошной; *2* – натрия; *3* – водорода; *4* – гелия. Спектры поглощения: *5* – солнечный; *6* – натрия; *7* – водорода; *8* – гелия.

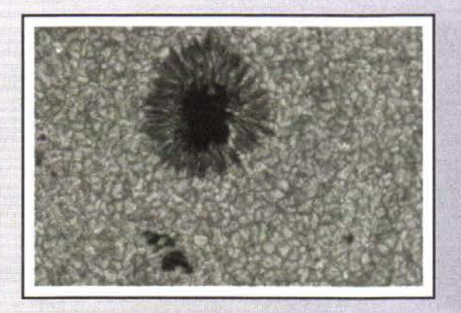


Рис. VI. Пятно и грануляция на Солнце.



Рис. VII. Фотография ядра кометы Галлея.

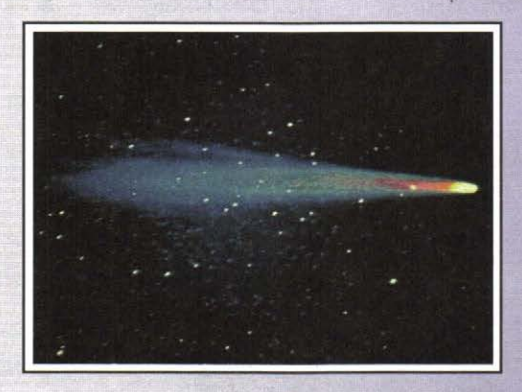


Рис. VIII. Комета Галлея.

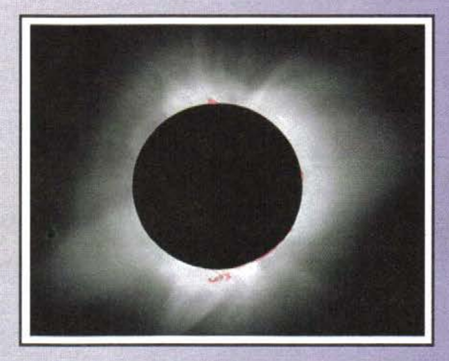


Рис. IX. Солнечная корона и протуберанец во время полного солнечного затмения.

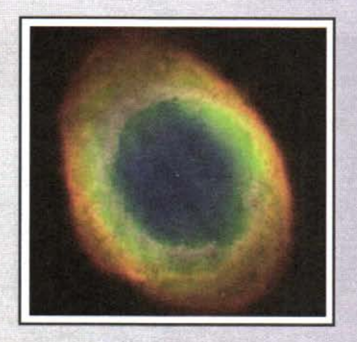


Рис. X. Планетарная туманность Кольцеобразная в созвездии Лира.



Рис. XI. Спиральная галактика Водоворот.



Рис. XII. Спиральная галактика Сомбреро, видимая с ребра.

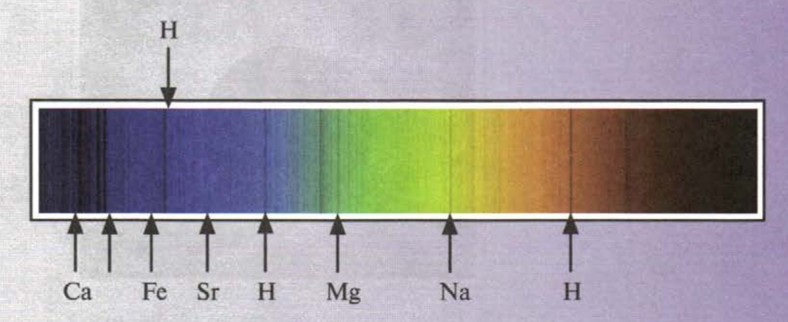


Рис. XIII. Солнечный спектр.

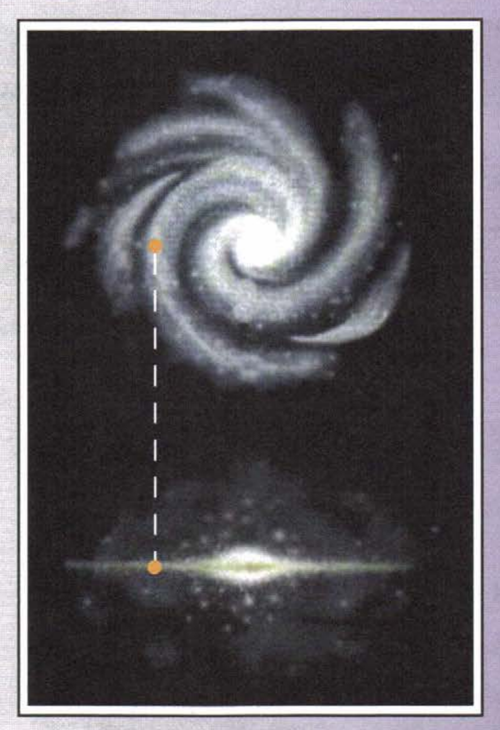


Рис. XIV. Схема строения Млечного Пути.



Рис. XV. Тесная двойная система с черной дырой в созвездии Лебедя.

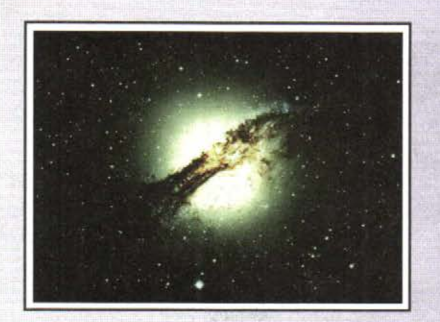


Рис. XVI. Радиогалактика Центавр А.



Рис. XVII. Туманность Ориона.



Рис. XVIII. Спиральная галактика с перемычкой.

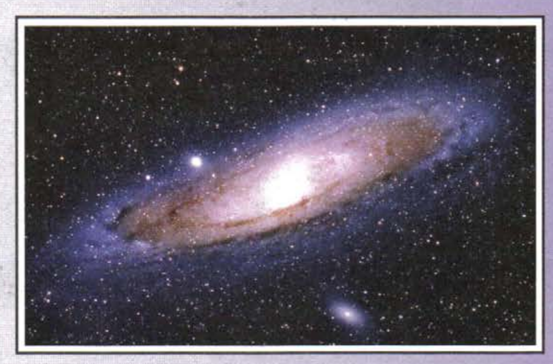


Рис. XIX. Туманность Андромеды.

Одновременно он предсказал, что при встрече позитрона с электроном обе частицы должны *исчезнуть*, породив фотоны большой энергии. Может протекать и обратный процесс — *рождение электронно-позитронной пары*, например при столкновении фотона достаточно большой энергии (его масса должна быть больше суммы масс покоя рождающихся частиц) с ядром.

Спустя два года позитрон был обнаружен с помощью камеры Вильсона, помещенной в магнитное поле. Направление искривления трека частицы указывало знак ее заряда. По радиусу кривизны и энергии частицы было определено отношение ее заряда к массе. Оно оказалось по модулю таким же, как и у электрона. На рисунке 14.2 вы видите первую фотографию, доказавшую существование позитрона. Частица двигалась снизу вверх и, пройдя свинцовую пластинку, потеряла часть своей энергии. Из-за этого кривизна траектории увеличилась.

Процесс рождения пары электрон — позитрон γ-квантом в свинцовой пластинке показан на фотографии, приведенной на рисунке 14.3. В камере Вильсона, находящейся в магнитном поле, пара оставляет характерный след в виде двурогой вилки.

Исчезновение (*аннигиляция*) одних частиц и появление других при реакциях между элементарными частицами является именно превращением, а не просто возникновением новой комбинации составных частей старых частиц. Особенно наглядно обнаруживается это при аннигиляции пары электрон — позитрон. Обе частицы обладают определенной массой в состоянии покоя и электрическими зарядами. Фотоны же, которые при этом рождаются, не имеют зарядов и не обладают массой покоя, так как не могут существовать в состоянии покоя.

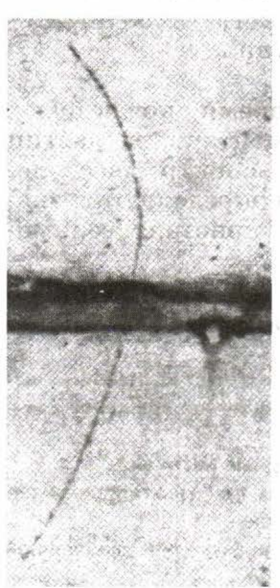


Рис. 14.2

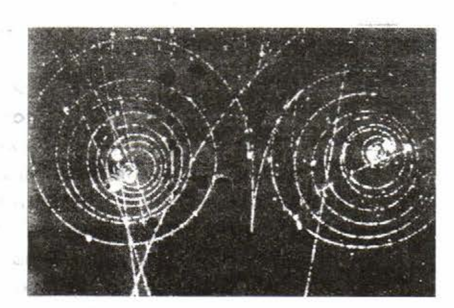


Рис. 14.3

В свое время открытие рождения и аннигиляции электронно-позитронных пар вызвало настоящую сенсацию в науке. До того никто не предполагал, что электрон, старейшая из частиц, важнейший строительный материал атомов, может оказаться не вечным. Впоследствии двойники — античастицы — были найдены у всех частиц. Античастицы противопоставляются частицам именно потому, что при встрече любой частицы с соответствующей античастицей происходит их аннигиляция. Обе частицы исчезают, превращаясь в кванты излучения или другие частицы.

Сравнительно недавно обнаружены *антипротон* и *антинейтрон*. Электрический заряд антипротона отрицателен.

Сейчас хорошо известно, что рождение пары *частица—античастица* и их аннигиляция не составляют монополии электронов и позитронов.

Атомы, ядра которых состоят из антинуклонов, а оболочка — из позитронов, образуют *антивещество*. В 1969 г. в нашей стране был впервые получен *антигелий*.

При аннигиляции антивещества с веществом энергия покоя превращается в кинетическую энергию образующихся γ-квантов.

Энергия покоя — самый грандиозный и концентрированный резервуар энергии во Вселенной. И только при аннигиляции она полностью высвобождается, превращаясь в другие виды энергии. Поэтому антивещество — самый совершенный источник энергии, самое калорийное «горючее». В состоянии ли будет человечество когда-либо это «горючее» использовать, сейчас сказать трудно.

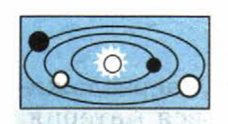
Можно надеяться, что недалеко то время, когда будет решена основная задача физики элементарных частиц и всей физики вообще. Будет получен спектр масс элементарных частиц и будет выяснено, чем определяются значения электрического заряда и других констант взаимодействия.



1. **В чем различие трех этапов развития физики элементарных частиц?**
2. **Электрон — самая легкая из заряженных частиц. Какой из известных вам законов сохранения запрещает превращение электрона в фотоны или нейтрино?**
3. **Перечислите все стабильные элементарные частицы.**
4. **Какова частота γ-квантов, возникающих при аннигиляции медленно движущихся электрона и позитрона?**
5. **Можно ли в пузырьковой камере наблюдать трек заряженной частицы с временем жизни 10^{-23} с?**
6. **Что такое кварк?**

КРАТКИЕ ИТОГИ ГЛАВЫ 14

1. Элементарные частицы — это первичные, неразложимые далее частицы, из которых построена вся материя. Элементарные частицы не остаются неизменными.
2. Все элементарные частицы способны превращаться друг в друга, и эти взаимные превращения — главный факт их существования.
   Большинство элементарных частиц нестабильно и превращается самопроизвольно с течением времени в другие частицы; исключение составляют фотон, электрон, протон и нейтрино.
3. Все частицы имеют двойников — античастицы. Например, по отношению к электрону античастицей является позитрон. Частица и античастица имеют одинаковые массы, а их заряды противоположны по знаку. При столкновении частицы с античастицей они исчезают (аннигилируют), превращаясь в другие частицы. Аннигиляция позитрона и электрона сопровождается рождением двух (или трех) гамма-квантов.
4. Число открытых элементарных частиц в 70-е гг. составило несколько десятков. Кроме того, обнаружено более двухсот короткоживущих частиц — резонансов (со временем жизни порядка 10^{-23} с). В связи с этим была высказана гипотеза, согласно которой все сильно взаимодействующие элементарные частицы построены из более фундаментальных частиц — кварков.
5. Кварки были обнаружены внутри протонов и нейтронов при наблюдении рассеяния электронов и нейтрино больших энергий на нуклонах. Однако в свободном состоянии кварки не найдены, и, по-видимому, расщепить нуклоны и другие частицы на кварки невозможно, так как силы взаимодействия кварков не убывают, а, напротив, увеличиваются по мере удаления их друг от друга.



АСТРОНОМИЯ

В этом разделе мы изучим строение Солнечной системы, законы, описывающие движение планет, проявления гравитационного взаимодействия в системе Земля — Луна, физические свойства Солнца и звезд. Используя известные законы физики, заглянем в недра звезд, обсудим их жизнь и смерть. Узнаем, что останется после смерти Солнца и более массивных звезд. Изучение мира галактик позволит нам узнать, как устроен Млечный Путь и где образуются звезды. Мы посмотрим, как наблюдаемое красное смещение в спектрах галактик указывает на расширение Вселенной в целом и что наблюдаемое реликтовое излучение, заполняющее всю Вселенную, указывает на то, что в прошлом Вселенная была не только плотной, но и горячей. Увидим, как знание законов небесной механики позволяет смоделировать движение не только планет, но и искусственных небесных тел.

Глава 15. СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА

Из текста этой главы мы узнаем, что сложные видимые петлеобразные движения планет среди звезд объясняются движением Земли и планет вокруг Солнца. Узнаем, что сложный характер движения Луны вокруг Земли и Земли вокруг Солнца объясняет смену лунных фаз, явление приливов и отливов, а также закономерности солнечных и лунных затмений. Изучим состав Солнечной системы.

§ 116 ВИДИМЫЕ ДВИЖЕНИЯ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ

Темной ночью мы можем увидеть на небе около 2500 звезд (с учетом невидимого полушария 5000), которые отличаются по блеску и цвету. Кажется, что они прикреплены к небесной сфере и вместе с ней обращаются вокруг Земли. Чтобы ориентироваться среди них, небо разбили на 88 созвездий. Во II в. до н. э. Гиппарх разделил звезды по блеску на звездные величины, самые яркие он отнес к звездам первой величины (1^m), а самые слабые, едва видимые невооруженным глазом, — к 6^m. В созвездии звезды обозначаются гречески-

ми буквами, некоторые самые яркие звезды имеют собственные названия. Так, Полярная звезда — α Малой Медведицы имеет блеск 2^m. Самая яркая звезда северного неба Вега — α Лиры имеет блеск около 0^m.

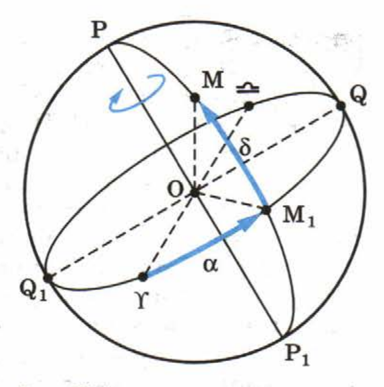


Рис. 15.1

Особое место среди созвездий занимали 12 зодиакальных созвездий, через которые проходит годичный путь Солнца — **эклиптика**. Так, в марте Солнце движется по созвездию Рыб, в мае — Тельца, в августе — Льва, в ноябре — Скорпиона.

В настоящее время для ориентации среди звезд астрономы используют различные системы небесных координат. Одна из них — экваториальная система координат (рис. 15.1). В ее основе лежит **небесный экватор** — проекция земного экватора на небесную сферу.

Эклиптика и экватор пересекаются в двух точках: весеннего (♈) и осеннего (♎) равноденствия.

Точка весеннего равноденствия находится в созвездии Рыбы, и она служит начальной точкой, от которой в направлении против часовой стрелки отсчитывается координата **прямое восхождение**, которую обычно обозначают буквой α. Эта координата является аналогом долготы в географических координатах. В астрономии принято прямое восхождение измерять в часовой мере, а не в градусной. При этом исходят из того, что полная окружность составляет

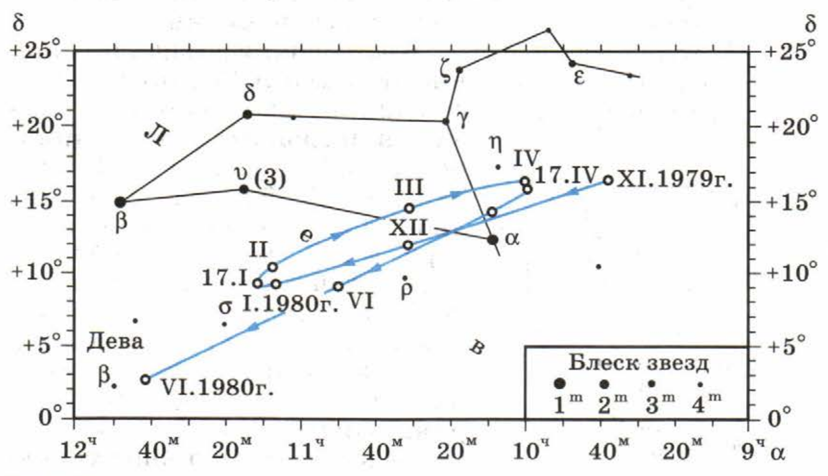


Рис. 15.2

24 ч. Вторая координата светила δ — **склонение** — является аналогом широты, ее измеряют в градусной мере. Так, звезда Альтаир (α Орла) имеет координаты $\alpha = 19^ч48^м18^с$, склонение $\delta = +8°44'$. Измеренные координаты звезд хранят в каталогах, по ним строят звездные карты (рис. 15.2), которые используют астрономы при поиске нужных светил.

Взаимное расположение звезд на небе не меняется, они совершают суточное вращение вместе с небесной сферой. Планеты наряду с суточным вращением совершают медленное движение среди звезд, оправдывая свое название (planetas в переводе с греческого — блуждающая звезда).

Видимый путь планет на небе петлеобразен. Размеры описываемых планетами петель различны. На рисунке 15.3 показано видимое петлеобразное движение Марса, которое длится 79 дней.

Наиболее просто видимое движение планет и Солнца описывается в системе отсчета, связанной с Солнцем. Такой подход получил название **гелиоцентрической системы мира** и был предложен польским астрономом Николаем Коперником (1473—1543).

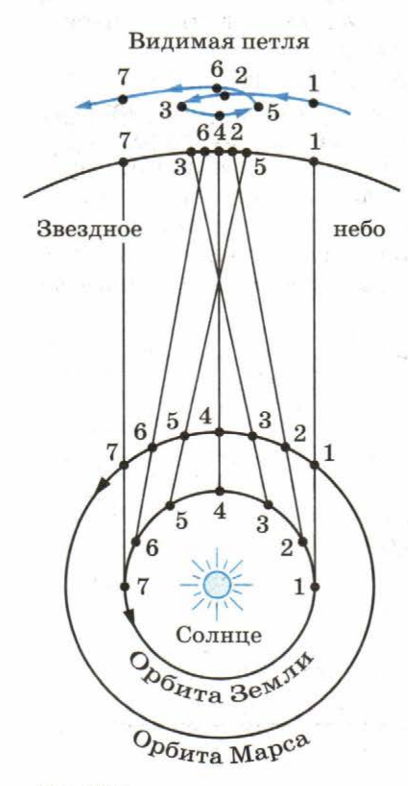


Рис. 15.3

В этой системе суточное движение небесного свода объясняется вращением Земли вокруг оси, годичное движение Солнца по эклиптике — движением Земли вокруг Солнца, а описываемые планетами петли — сложением движений Земли и планет (см. рис. 15.3). Вокруг Земли движется только Луна. Коперник рассчитал расстояния планет до Солнца.

В астрономии среднее расстояние от Земли до Солнца принято за единицу расстояния и называется **астрономической единицей** (а. е.), 1 а. е. $= 150 \cdot 10^6$ км. Так, Меркурий находится от Земли на расстоянии 0,39 а. е., а Сатурн — на расстоянии 9,54 а. е.

В античные времена и вплоть до Коперника полагали, что в центре Вселенной расположена Земля и все небесные тела обращаются по сложным траекториям вокруг нее. Эта система мира называется **геоцентрической системой мира**.

Доказательство движения Земли вокруг Солнца и определение расстояний до звезд. Если Земля обращается вокруг Солнца, то близкие звезды должны периодически смещаться на фоне более далеких звезд. Это смещение называется **параллактическим**, а угол π, под которым со звезды виден радиус земной орбиты, называется **параллаксом**. Как видно из рисунка 15.4, расстояние до звезды

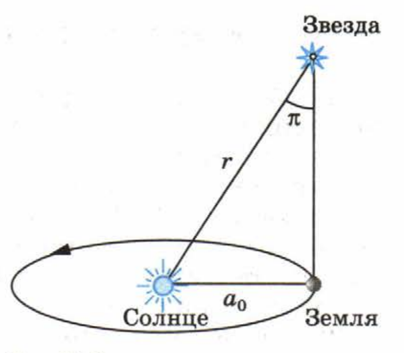


Рис. 15.4

$$r = \frac{a_0}{\sin \pi} = \frac{a_0}{\pi_{\text{рад}}} = \frac{a_0 \cdot 206\,265}{\pi''}.$$

Так как параллакс звезд мал, мы заменили синус малого угла самим углом, выраженным в радианной мере, а затем перешли от радианной меры к градусной, учтя, что 1 рад = 206 265″. В астрономии принято измерять расстояние до звезд в *парсеках* (пк).

$$1 \text{ пк} = 206\,265 \cdot a_0 = 206\,265 \cdot 150 \cdot 10^6 \text{ км} = 3 \cdot 10^{13} \text{ км}.$$

Итак, если параллакс измерять в угловых секундах, а расстояние до звезды — в парсеках, то связью между ними будет равенство

$$r_{\text{пк}} = \frac{1}{\pi}. \qquad (15.\ 1)$$

Только во второй половине XIX в. удалось измерить параллаксы и расстояния до звезд и тем самым подтвердить теорию Коперника наблюдениями. Так, ближайшая к нам звезда α Центавра имеет параллакс $\pi = 0{,}751''$, поэтому расстояние до нее $r = 1{,}33$ пк $= 4 \cdot 10^{13}$ км.

Для определения положения звезд используются небесные экваториальные координаты. Сложное петлеобразное движение планет объясняется движением Земли и планет вокруг Солнца, а наблюдение годичного параллакса у звезд не только подтверждает обращение Земли вокруг Солнца, но и позволяет определять расстояния до них.



1. **Что называется небесным экватором?**
2. **Что такое эклиптика?**
3. **Чем отличается геоцентрическая система мира от гелиоцентрической?**
4. **Что такое парсек?**

§ 117 ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ ПЛАНЕТ

В конце XVI в. датский астроном И. Кеплер, изучая движение планет, открыл три закона их движения. На основании этих законов И. Ньютон вывел формулу для закона всемирного тяготения. В дальнейшем, используя законы механики, И. Ньютон решил задачу двух тел — вывел законы, по которым одно тело движется в поле тяготения другого тела. Он получил три обобщенных закона Кеплера.

Первый закон Кеплера. ***Под действием силы притяжения одно небесное тело движется в поле тяготения другого небесного тела по одному из конических сечений — кругу, эллипсу, параболе или гиперболе*** (рис. 15.5).

Планеты движутся вокруг Солнца по эллиптической орбите (рис. 15.6). Ближайшая к Солнцу точка орбиты называется **перигелием**, самая далекая — **афелием**. Линия, соединяющая какую-либо точку эллипса с фокусом, называется **радиус-вектором**. Отношение расстояния между фокусами к большой оси (к наибольшему диаметру) называется **эксцентриситетом** e. Эллипс тем сильнее вытянут, чем больше его эксцентриситет. Большая полуось эллипса a — среднее расстояние планеты до Солнца.

По эллиптическим орбитам движутся и кометы и астероиды. У окружности $e = 0$, у эллипса $0 < e < 1$, у параболы $e = 1$, у гиперболы $e > 1$ (см. рис. 15.5).

Движение естественных и искусственных спутников вокруг планет, движение одной звезды вокруг другой в двойной системе также подчиняются этому первому обобщенному закону Кеплера.

Второй закон Кеплера. ***Каждая планета движется так, что радиус-вектор планеты за равные промежутки времени описывает равные площади.***

Планета проходит путь от точки A до A' и от B до B' (рис. 15.7) за одно и то же время. Другими словами, планета движется быстрее всего в перигелии, а медленнее всего —

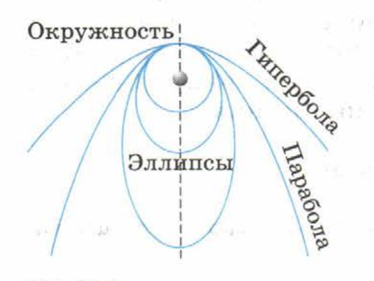


Рис. 15.5

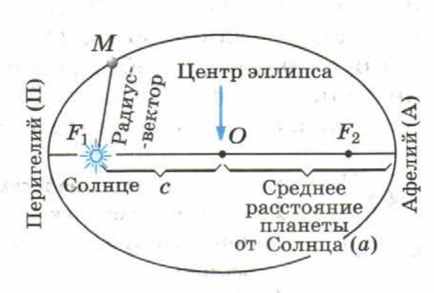


Рис. 15.6

когда находится на наибольшем удалении (в афелии). Таким образом, второй закон Кеплера определяет скорость движения планеты. Она тем больше, чем планета ближе к Солнцу. Так, скорость кометы Галлея в перигелии равна 55 км/с, а в афелии 0,9 км/с.

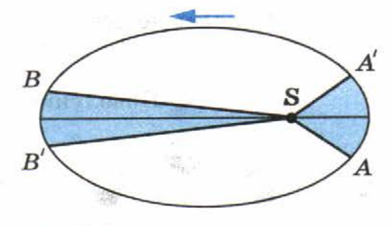


Рис. 15.7

Третий закон Кеплера. ***Куб большой полуоси орбиты тела, деленный на квадрат периода его обращения и на сумму масс тел, есть величина постоянная.***

Если T — период обращения одного тела вокруг другого тела на среднем расстоянии a, то третий обобщенный закон Кеплера записывается как

$$a^3/[T^2 (M_1 + M_2)] = G/4\pi^2 , \qquad (15.2)$$

где M_1 и M_2 — массы притягивающихся двух тел, а G — гравитационная постоянная. Для Солнечной системы масса Солнца $M_\odot = M_1 \gg M_2$ массы любой планеты, и тогда

$$a^3/T^2 = GM_\odot/4\pi^2. \qquad (15.3)$$

Правая часть уравнения — постоянная для всех тел Солнечной системы, что и утверждает третий закон Кеплера, полученный ученым из наблюдений.

Третий обобщенный закон Кеплера позволяет определять массы планет по движению их спутников, а массы двойных звезд — по элементам их орбит.

Движение планет и других небесных тел вокруг Солнца под действием силы тяготения происходит по трем законам Кеплера. Эти законы позволяют рассчитывать положения планет и определять их массы по движению спутников вокруг них.



1. **Перечислите основные элементы эллиптической орбиты планеты.**
2. **Как связаны периоды обращения планет с их средними расстояниями до Солнца?**
3. **Сформулируйте первый обобщенный закон Кеплера.**
4. **Запишите третий обобщенный закон Кеплера.**

§ 118 СИСТЕМА ЗЕМЛЯ — ЛУНА

Видимое движение Луны. Луна — ближайшее к Земле небесное тело и ее естественный спутник. Луна делает один оборот вокруг Земли за 27,3 сут. и с таким же периодом вращается вокруг своей оси, поэтому с Земли видно

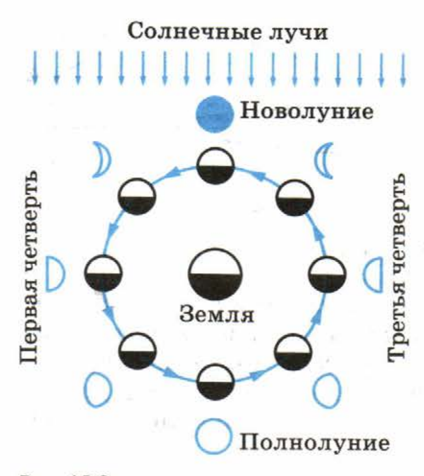


Рис. 15.8

только одно ее полушарие. Обратную сторону Луны впервые удалось увидеть только 7 октября 1959 г., когда советская автоматическая станция «Луна-3» облетела Луну и сфотографировала ее обратную сторону, передав снимки на Землю.

Видимое перемещение Луны происходит неравномерно, потому что Луна движется в пространстве по эллиптической орбите, в одном из фокусов которой находится центр Земли. Большая полуось лунной орбиты $a = 384\ 400$ км $= 60{,}3R_{\oplus}$ ($R_{\oplus}$ — радиус Земли), эксцентриситет $e = 0{,}055$.

Луна, подобно Земле, представляет собой темный непрозрачный шар, светящий отраженным солнечным светом. Солнце всегда освещает примерно половину этого шара, другая половина остается темной. Но так как к Земле обыкновенно бывают обращены и часть светлого видимого полушария, и часть неосвещенного, то Луна бóльшую часть времени кажется нам неполной. Различают четыре основные фазы Луны: новолуние, первая четверть, полнолуние и последняя четверть.

На рисунке 15.8 показаны положения Луны относительно Земли и Солнца для различных фаз.

Интервал времени между двумя последовательными новолуниями, равный 29,5 сут., получил название **синодический месяц** (период). Синодический месяц лежит в основе лунного календаря.

Солнечные и лунные затмения. Периодически Луна частично или полностью заслоняет Солнце — такое явление называется **солнечным затмением,** оно может произойти во время новолуний. Когда Луна попадает в тень Земли, наступает **лунное затмение**, которое может наступить во время полнолуний. Вследствие наклона лунной орбиты к эклиптике эти явления происходят не каждый месяц, а значительно реже. На протяжении календарного года происходят от 2 до 5 солнечных затмений и от 0 до 3 лунных затмений.

Еще древние вавилоняне заметили, что все затмения повторяются в том же порядке примерно через 18 лет и 11 дней. Этот период у древних вавилонян назывался циклом Сароса (в переводе с египетского *сарос* — повторение), им пользовались для предсказаний затмений.

Приливные явления. Под действием лунного притяжения водная оболочка Земли принимает слегка вытянутую в сторону Луны (и противоположную сторону) форму. Там, где Луна выше всего над горизонтом и где ниже всего под горизонтом, будет прилив. На восходе и заходе Луны будут наблюдаться отливы (рис. 15.9). Действительно, ближайшая к Луне точка *A* будет испытывать большее притяжение к Луне, чем центр Земли *E* и точка *C* (эти силы отмечены синим цветом). Разница сил между точками *A* и *E* называется приливной силой (отмечена черной стрелкой), и она направлена от центра Земли к Луне. В точке *B* приливная сила направлена в противоположную сторону от Луны, а в точках *C* и *D* приливная сила направлена к центру Земли. Таким образом, вода под действием приливной силы будет оттекать из *C* и *D* (отлив) и собираться в *A* и *B* (прилив).

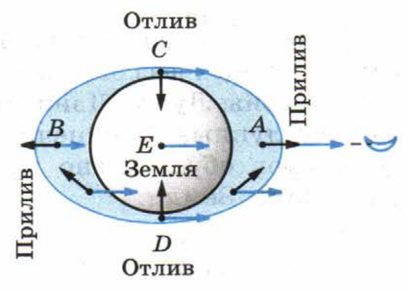


Рис. 15.9

Во время приливов уровень воды плавно нарастает, достигая наибольшего значения, а затем постепенно снижается до низшего уровня. Вследствие вращения Земли приливные выступы образуются в каждый следующий момент уже в новых точках земной поверхности. Максимумы подъемов воды чередуются через определенные промежутки времени, близкие к 12 ч 26 мин. Таким образом, в каждом месте океанского берега за 24 ч 52 мин бывают два прилива и два отлива. Максимальные приливы бывают, когда Луна находится выше всего над горизонтом и ниже всего под горизонтом. Из-за движения Луны вокруг Земли Луна проходит выше всего над горизонтом как раз через 24 ч 52 мин. Это указывает на взаимосвязь между Луной и приливами. Действительно, явление приливов вызывается притяжением Луны.

Солнце, как и Луна, также вызывает приливы. Несмотря на большую удаленность от Земли, но благодаря большой массе Солнца приливы, которые оно вызывает, всего в 2,5 раза меньше лунных.

Во время полнолуний и новолуний лунные и солнечные приливы складываются и наблюдаются самые большие приливы. Напротив, когда Луна в первой или последней четверти, во время лунного прилива будет солнечный отлив; действие Солнца вычитается из действия Луны, и приливы бывают существенно меньшими.

Луна движется вокруг Земли по эллиптической орбите. Смена лунных фаз определяется изменением вида освещенной стороны Луны. Движением Луны вокруг Земли объясняются лунные и солнечные затмения. Явление приливов и отливов обусловлено притяжением Луны и большими размерами Земли.

§ 119 ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ПЛАНЕТ И МАЛЫХ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

По современным данным, вокруг Солнца обращаются восемь крупных шарообразных тел, называемых **планетами** (рис. 15.10). Наряду с планетами и их спутниками вокруг Солнца обращаются планеты-карлики, тысячи малых планет, называемых астероидами, а также кометы и частички пыли. Масса Солнца в 740 раз превышает массу всех планет, благодаря этому оно своим сильным гравитационным полем удерживает планеты около себя. Поверхность Солнца нагрета до температуры около 6000 К, поэтому оно излучает собственный свет, а планеты освещаются Солнцем и светят отраженным светом.

Планеты вращаются вокруг Солнца в том же направлении, что и Солнце вокруг своей оси, и удалены от Солнца

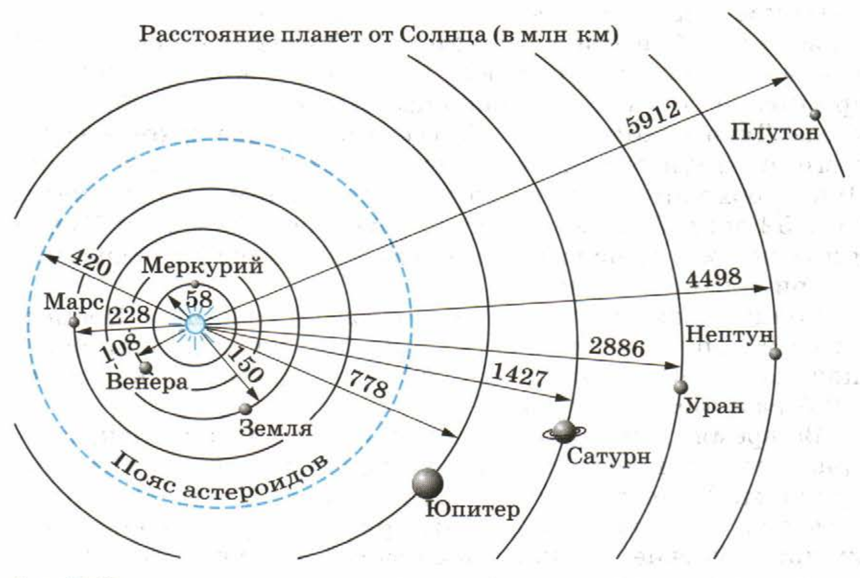


Рис. 15.10

в следующем порядке: Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун (по современным данным Плутон относят к планетам-карликам). По физическим характеристикам их объединяют в две группы, разграниченные в пространстве поясом астероидов.

Планеты земной группы. Планеты, движущиеся внутри пояса астероидов (Меркурий, Венера, Земля и Марс), принадлежат к **земной группе**, так как имеют много общего. Все эти планеты, небольшие по размерам и массе (самая крупная из них — Земля), имеют твердую поверхность, сравнительно высокую среднюю плотность, близкую к плотности Земли (5,5 г/см^3), и обладают атмосферами (кроме Меркурия). Планеты земной группы состоят из тяжелых химических элементов.

Наличие атмосферы, содержащей наряду с другими газами углекислый газ, привело к тому, что на поверхности Венеры и Земли действует парниковый эффект. Углекислый газ, а у Земли и водяные пары, пропускают солнечный свет, который нагревает поверхность и атмосферу. Нагретая поверхность испускает инфракрасные лучи, но эти лучи углекислый газ не пропускает наружу в космическое пространство и поверхность не охлаждается. Тепло скапливается у поверхности. Так, температура поверхности Венеры составляет почти 500 °С. А если бы атмосфера Земли не содержала углекислый газ, то температура на ее поверхности была бы на 40° ниже существующей. Так что без парникового эффекта Земля была бы покрыта льдом.

Планеты-гиганты. Планеты, движущиеся за кольцом астероидов, образуют группу **планет-гигантов**, возглавляемую Юпитером — самой крупной и массивной планетой Солнечной системы. К этой группе относятся также Сатурн, Уран и Нептун. Они обладают значительными размерами, малой средней плотностью (большая плотность у Нептуна — 1,66 г/см^3, самая малая у Сатурна — 0,7 г/см^3), быстрым вращением, протяженными гелиево-водородными атмосферами с небольшим содержанием аммиака и метана и, по-видимому, не имеют твердой поверхности. Планеты-гиганты состоят из легких химических элементов, в основном водорода и гелия. Планеты-гиганты окружены кольцами, состоящими из мелких твердых частиц. Вокруг планет-гигантов обращаются десятки спутников.

Только у Меркурия и Венеры отсутствуют спутники. Крупные спутники (такие, как Луна у Земли или Титан у Сатурна) имеют шарообразную форму, а мелкие (как Фобос и Деймос у Марса) — неправильную форму, свойственную большинству астероидов.

Астероиды. В начале XIX в. между орбитами Марса и Юпитера были обнаружены звездообразные тела — **астероиды**, которые двигались вокруг Солнца на расстояниях 2,3—3,3 а. е. Астероиды — небольшие бесформенные тела, самый крупный из них — Церера — имеет в поперечнике около 950 км. Сейчас известно несколько тысяч астероидов, некоторые из них имеют орбиты, пересекающие орбиту Земли. Общая масса всех астероидов небольшая, существенно меньше массы любой планеты.

Кометы. Эти небесные светила получили свое название от греческого слова *кометас* — хвостатая, или косматая, звезда. Яркие кометы появляются сравнительно редко, в среднем одна комета за 10—15 лет. Слабые же по блеску кометы появляются часто (на фотографиях звездного неба ежегодно обнаруживают несколько комет).

Большинство комет входят в состав нашей Солнечной системы. Под действием притяжения Солнца они, как и планеты, обращаются вокруг него по вытянутым эллиптическим орбитам (рис. 15.11). Самой известной кометой является комета Галлея (рис. VIII цветной вклейки), названная так в честь первого исследователя комет, который предсказал появление этой кометы. Она движется по очень вытянутой эллиптической орбите (a = 18 а. е. и e = 0,967). В перигелии она сближается с Солнцем до расстояния 0,59 а. е. (заходит внутрь орбиты Венеры), а в афелии удаляется до 35,3 а. е. за орбиту Нептуна. Последний раз комета появилась в 1986 г. В момент ее прохождения вблизи Солнца для ее изучения был осуществлен полет четырех космических аппаратов, два из которых — «Вега-1» и «Вега-2».

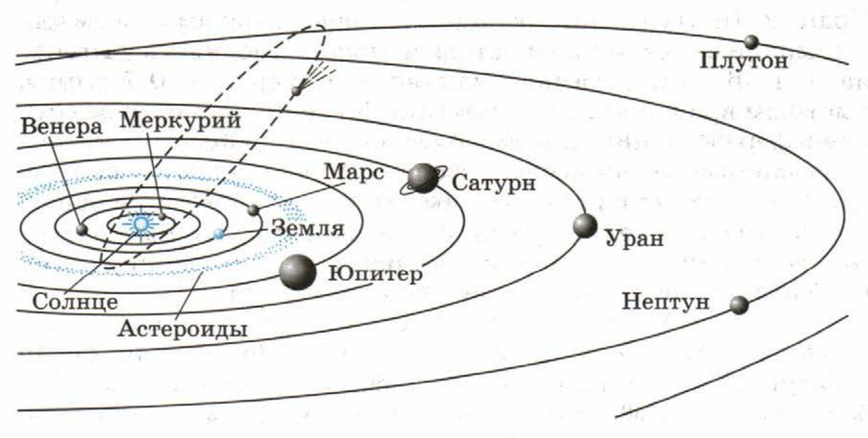


Рис. 15.11

Фотографирование ядра кометы Галлея советскими космическими станциями с расстояния около 8000 км показало, что оно имеет неправильную форму с размерами $16 \times 18 \times 8$ км (рис. VII цветной вклейки). В следующий раз ее можно будет увидеть в 2062 году.

На больших расстояниях от Солнца кометы представляют собой глыбы твердого вещества из льда, застывших газов и пыли, вмороженных частиц метеорного вещества. При приближении к Солнцу лед начинает таять и испаряться, вокруг ядра кометы, начальные размеры которого не превышают десятков километров, образуется протяженная оболочка — **кома.** Под действием давления солнечного света и солнечного ветра часть газов комы отталкивается в сторону, противоположную Солнцу, образуя **хвост** кометы. Массы комет оцениваются в 10^{15}—10^{18} кг.

В конце концов комета теряет вещество и распадается на части.

Метеоры и метеориты. Метеоры (от греческого слова *метеорос* — парящий в воздухе) — это вспыхивающие в земной атмосфере мельчайшие твердые частицы, которые вторгаются в нее извне с огромной скоростью. Метеоры часто называют падающими звездами. В межпланетном пространстве хаотично движется с различными скоростями множество таких частиц. Массы подавляющего их большинства измеряются десятыми и тысячными долями грамма, в редких случаях — несколькими граммами. Если в атмосферу влетает частица со скоростью свыше 30 км/с, то из-за трения о воздух она быстро раскаляется, вспыхивает и порождает метеор. Чем больше масса и скорость частицы, тем ярче метеорная вспышка. В среднем по всему небу за 1 ч появляются 5—6 ярких метеоров.

Помимо отдельных метеорных частиц вокруг Солнца движутся целые их рои, называемые **метеорными потоками.** Они порождены распадающимися или уже распавшимися кометами. Каждый метеорный рой обращается вокруг Солнца с постоянным периодом, равным периоду обращения породившей его кометы, и многие из них в определенные дни года встречаются с Землей. В эти дни число метеоров значительно возрастает, а если метеорный рой компактный, то наблюдаются метеорные, или звездные, дожди, когда в одной ограниченной области неба за одну минуту вспыхивают сотни метеоров.

Многие метеорные потоки связаны с кометами. Так, метеорный поток, исходящий из созвездия Ориона (Ориониды), связан с кометой Галлея, а метеорный поток Андромениды — с распавшейся кометой Биэлы.

Помимо пыли, в межпланетном пространстве движется множество твердых тел размерами от сантиметров до десятков метров. При падении на Землю они получают название **метеоритов**.

По химическому составу метеориты подразделяют на три группы: каменные, железокаменные и железные. Самый крупный железный метеорит — Гоба — найден на территории Намибии: он имеет размеры 3×3×1 м, а массу — 60 т.

На месте падения крупных метеоритов образуются метеоритные кратеры значительных размеров. Такие кратеры обнаружены в Аризоне (США), Канаде, на Таймыре (Россия) и в других местах. У Аризонского метеоритного кратера диаметр 1207 м, глубина 174 м, а высота окружающего его вала составляет от 40 до 50 м.

На других планетах и их спутниках также обнаружены кратеры метеоритного происхождения. Крупные метеориты могут образовать кратеры диаметром в несколько десятков километров.

Вокруг Солнца обращаются две группы больших планет: планеты земной группы, похожие на Землю, и планеты-гиганты, похожие на Юпитер. Между орбитами Марса и Юпитера расположен пояс астероидов. Кометы движутся вокруг Солнца по очень вытянутым орбитам, при движении вблизи Солнца у кометы образуется хвост.



1. **Планеты какой группы состоят в основном из легких химических элементов (водорода и гелия)?**
2. **Почему температура поверхности Венеры столь высокая?**
3. **Что такое астероиды?**
4. **Почему на больших расстояниях от Солнца у комет нет хвостов?**
5. **Чем отличаются метеоры от метеоритов?**

КРАТКИЕ ИТОГИ ГЛАВЫ 15

1. Видимые движения планет легко описываются в гелиоцентрической системе координат.
2. Движение планет и их спутников подчиняется законам Кеплера.
3. Планеты разделяются на две группы, которые сильно отличаются по своим физическим характеристикам: планеты земной группы и планеты-гиганты.
4. Приливы и отливы объясняются гравитационным взаимодействием между Землей и Луной.

Глава 16. СОЛНЦЕ И ЗВЕЗДЫ

В этой главе мы рассмотрим строение Солнца и звезд, а также их основные характеристики.

§ 120 СОЛНЦЕ

Основные характеристики Солнца. Солнце — лишь одна из бесчисленного множества звезд, существующих в природе. Благодаря близости Земли к Солнцу мы имеем возможность изучать происходящие на нем процессы и по ним судить об аналогичных процессах в звездах, непосредственно не видимых из-за колоссального их удаления.

Шарообразное Солнце представляется нам светящимся диском. Видимая поверхность Солнца называется **фотосферой**, ее радиус считается радиусом Солнца. На среднем расстоянии от Солнца до Земли ($a_0 = 1$ а. е.), угол, под которым виден радиус фотосферы $\theta = 16'$, поэтому линейный радиус Солнца $R_\odot = a_0 \cdot \sin\theta = 1{,}5 \cdot 10^8$ км $\cdot\ 0{,}00465 =$ $= 700\ 000$ км, что в 109 раз превышает радиус Земли.

Масса Солнца определяется по движению Земли вокруг Солнца и третьему обобщенному закону Кеплера, согласно которому (если пренебречь массой планеты по сравнению с массой Солнца $M_\odot$)

$$M_\odot = \frac{a^3 \cdot 4\pi^2}{GT^2} = \frac{(1{,}5 \cdot 10^{11}\ \text{м})^3 \cdot 4 \cdot (3{,}14)^2}{6{,}67 \cdot 10^{-11} \cdot (3{,}2 \cdot 10^7\ \text{с})^2} = 2 \cdot 10^{30}\ \text{кг}.$$

В этой формуле $a = a_0$, $G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}$ м^3/кг $\cdot$ с^2 — гравитационная постоянная, $T = T_0 = 365{,}25$ сут. — период обращения Земли вокруг Солнца. Так как 1 сут. = 1440 мин = = 86 400 с, то $T_0 = 365{,}25 \cdot 86\ 400 = 3{,}2 \cdot 10^7$ с.

Ускорение свободного падения на поверхности Солнца в 28 раз больше, чем на поверхности Земли, и равно 274 м/с^2.

На фотографических снимках Солнца часто видны темные пятна, возникающие в его фотосфере. Если в течение нескольких дней следить за пятнами, то можно заметить их перемещение, что указывает на вращение Солнца вокруг оси. Такие наблюдения показали, что Солнце вращается не как твердое тело. Период его обращения вокруг оси вблизи экватора составляет 25 сут., а вблизи полюса — 30 сут. Линейная скорость вращения Солнца на экваторе составляет 2 км/с.

Измерение освещенности, которую создает Солнце на Земле, показало, что на земную поверхность площадью в 1 м^2, расположенную перпендикулярно к солнечным лу-

чам, ежесекундно поступает от Солнца энергия, равная 1370 Дж. Эта величина получила название **солнечной постоянной** $E_{\odot} = 1{,}37$ кВт/м^2. По ней нетрудно рассчитать **светимость** Солнца $L_{\odot}$, или мощность солнечного излучения — энергию, излучаемую Солнцем за 1 с со всей его поверхности. Для этого достаточно умножить солнечную постоянную на площадь поверхности сферы, в центре которой находится Солнце, радиус которой равен расстоянию от Земли до Солнца $a_0 = 1{,}5 \cdot 10^{11}$ м. Так как площадь поверхности сферы радиусом a_0 равна $S = 4\pi R^2$, где $\pi = 3{,}14$, то светимость Солнца

$$L_{\odot} = SE_{\odot} = 4 \cdot 3{,}14\,(1{,}5 \cdot 10^{11}\ \text{м})^2 \cdot 1{,}37 \cdot 10^3\ \text{Вт/м}^2 = \\ = 4 \cdot 10^{26}\ \text{Вт}.$$

На долю Земли приходится всего лишь одна двухсотмиллиардная доля энергии, излучаемой Солнцем, но и ее достаточно для расцвета и многообразия жизни на нашей планете.

Судить о температуре Солнца (и звезд) мы можем только по его (их) излучению. Солнце является источником излучения различных длин волн — от длинноволнового радио- до коротковолнового рентгеновского и гамма-излучения. На рисунке XIII цветной вклейки показан наблюдаемый спектр Солнца в видимом диапазоне длин волн, полученный с помощью спектрографа. На нем мы видим, что на фоне непрерывного спектра (цветная радуга) видны линии поглощения различных химических элементов.

По наличию спектральных линий астрономы определяют химический состав Солнца. Оказалось, что Солнце почти на 71% состоит из водорода, 27% составляет гелий, на остальные химические элементы приходится около 2% массы.

Астрономы предполагают, что излучение Солнца близко по своим характеристикам к излучению абсолютно черного тела, законы излучения которого хорошо известны.

Согласно *закону Вина* длина волны, на которую приходится максимум излучения нагретого тела λ_{max}, связана с температурой T формулой

$$\lambda_{max} = \frac{2{,}9 \cdot 10^{-3}}{T}. \qquad (16.1)$$

Максимум излучения Солнца приходится на длину волны $\lambda_{max} = 4{,}8 \cdot 10^{-7}$ м, следовательно, температура Солнца должна быть

$$T = \frac{2{,}9 \cdot 10^{-3}}{\lambda_{max}} = \frac{2{,}9 \cdot 10^{-3}}{4{,}8 \cdot 10^{-7}} = 6000\ \text{К}.$$

Другой метод оценки температуры основан на **законе Стефана — Больцмана**, который гласит: ***мощность излучения i с квадратного метра поверхности абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры T***, т. е.

$$i = \sigma T^4 \text{ Вт/м}^2, \quad (16.2)$$

где $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м^2 · К) — постоянная величина. Так как площадь солнечной поверхности $S = 4\pi R_\odot^2$, то светимость Солнца

$$L_\odot = iS = \sigma T^4 4\pi R_\odot^2 = 4 \cdot 10^{26} \text{ Вт}. \quad (16.3)$$

Отсюда следует, что температура солнечной фотосферы $T_\odot = \sqrt[4]{\dfrac{L_\odot}{\sigma 4\pi R_\odot^2}}$. Подставляя в эту формулу указанные выше значения, получим, что $T_\odot = 5800$ К, что мало отличается от результата, полученного по закону Вина. Обычно среднюю температуру солнечной фотосферы считают близкой к 6000 К.

Строение солнечной атмосферы. Все виды излучений, которые мы воспринимаем от Солнца, образуются в его самых верхних слоях, в атмосфере. Самый глубокий и плотный слой атмосферы — фотосфера — имеет толщину около 200 км, плотность вещества в ней составляет 10^{-5} кг/м^3, что значительно меньше плотности земной атмосферы. Несмотря на малое значение толщины и плотности, фотосфера непрозрачна для всех видов излучений, образующихся в более глубоких слоях Солнца, поэтому мы не можем заглянуть в его подфотосферные слои.

В фотосфере видна зернистая структура, получившая название **грануляции** (рис. VI на цветной вклейке). Характерные угловые размеры гранул, напоминающих по виду рисовые зерна, составляют 1—2′, но линейные их размеры достигают тысяч и более километров. Наблюдения показывают, что грануляция находится в непрерывном движении и изменении. Гранулы живут от 5 до 10 мин, а потом на их месте появляются новые. В центре более яркой и горячей части гранулы происходит подъем из-под фотосферы более горячего вещества и опускание под фотосферу более темного и холодного вещества, окаймляющего гранулу. Скорость подъема и опускания газа составляет около 1 км/с, а разница между температурой горячего и холодного вещества близка к 300 К. Таким образом, грануляция на Солнце указывает на то, что энергия в фотосферу поступает из более глубоких и горячих слоев Солнца путем конвекции.

На ярком фоне фотосферы наблюдаются темные пятна. На рисунке VI цветной вклейки показан участок фотосферы с пятном. Размеры солнечных пятен могут превышать 10 000 км! Такие крупные пятна хорошо видны даже невооруженным глазом (конечно, только сквозь темный светофильтр).

На фоне ослепительно яркой фотосферы пятно кажется нам черным. Однако измерения показали, что яркость пятен в 5—10 раз меньше яркости окружающей фотосферы, а их реальный цвет — красноватый. По этим измерениям оказалось, что температура пятен около 4000 К.

Наблюдения показали наличие сильного магнитного поля в пятнах. В некоторых пятнах магнитная индукция достигает 0,5 Тл, в то время как в среднем в фотосфере она составляет 10^{-4}—10^{-5} Тл.

На рисунке IX цветной вклейки показана фотография Солнца, полученная во время полного солнечного затмения. На снимке хорошо видна внешняя часть солнечной атмосферы — **корона**, имеющая вид лучистого жемчужного сияния, яркость которого в миллион раз меньше яркости фотосферы. Солнечная корона прослеживается до расстояний в десять и более радиусов Солнца.

Солнечная корона нагрета до температуры около $2 \cdot 10^6$ К. При такой температуре вещество короны представляет собой полностью ионизованную плазму, излучающую в рентгеновском диапазоне. И действительно, при наблюдениях в рентгеновские телескопы, которые установлены на космических астрономических обсерваториях за пределами земной атмосферы, солнечная корона представляется в полной красе, в то время как поверхность Солнца (фотосфера) практически не видна.

Во время полных солнечных затмений на краю Солнца, во внутренних слоях солнечной короны, наблюдаются **протуберанцы** — струи горячего вещества, имеющие вид выступов и фонтанов. Некоторые из них — спокойные протуберанцы — в течение многих часов висят над солнечной поверхностью, другие — *эруптивные* (взрывные) — внезапно с огромной скоростью взлетают над поверхностью, быстро поднимаются до высоты в десятки и даже сотни тысяч километров и так же быстро падают вниз.

Из короны в межпланетное пространство истекает непрерывный поток частиц (протонов, ядер гелия, ионов, электронов), называемый **солнечным ветром**. Частицы солнечного ветра покидают солнечную корону со скоростью около 800 км/с, поэтому солнечное притяжение не может их удержать. Вблизи Земли скорость солнечного ветра достигает 500 км/с.

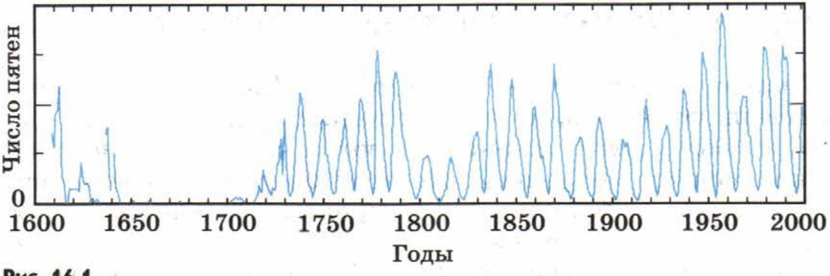


Рис. 16.1

Солнечная активность. Количество солнечных пятен меняется с периодом около 11 лет. На рисунке 16.1 показано наблюдаемое изменение числа пятен на Солнце с начала XVII в. Когда наблюдается максимальное число пятен, то говорят о максимуме солнечной активности. В годы максимума солнечной активности значительно возрастает число мощных протуберанцев, в такт с солнечной активностью меняется и форма солнечной короны. Одним из самых значительных проявлений солнечной активности являются солнечные вспышки, во время которых выделяется колоссальная энергия — в течение десятка минут выделяется энергия до 10^{25}Дж. Наблюдения со спутников установили, что во время солнечных вспышек происходит резкое увеличение ультрафиолетового излучения, появляется мощное рентгеновское и гамма-излучение. Датчики быстрых заряженных частиц, установленные на искусственных спутниках, показали, что при мощных солнечных вспышках в межпланетное пространство выбрасываются с огромными скоростями, иногда доходящими до 100 000 км/с, мириады частиц, обладающих большой кинетической энергией и получивших название **солнечных космических лучей**. Их основной состав — ядра атомов водорода, гелия, а также электроны.

Вспышки и другие проявления солнечной активности оказывают значительное влияние на физические условия в земной атмосфере и околоземном космическом пространстве и, как следствие, на биологические явления.

Астрономы не только взвесили Солнце, но и измерили температуру его поверхности и светимость. Наземные и космические исследования позволили изучить солнечную атмосферу и обнаружить проявления солнечной активности.



1. **Какую освещенность создает Солнце на поверхности Земли (солнечная постоянная)?**
2. **Что указывает на существование конвекции внутри Солнца?**
3. **Чему равен период солнечной активности и как она себя проявляет?**

§ 121 ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВЕЗД

Диаграмма «спектр — светимость». Как и Солнце, звезды освещают Землю, но из-за огромного расстояния до них освещенность, которую они создают на Земле, на много порядков меньше солнечной. По этой причине и возникают технические проблемы при измерениях освещенности от звезд. Астрономы строят гигантские телескопы, чтобы уловить слабые излучения звезд. Чем больше диаметр объектива телескопа, тем более слабые звезды можно с его помощью исследовать. Измерения показали, что, например, Полярная звезда создает освещенность на поверхности Земли $E = 3{,}8 \cdot 10^{-9}$ Вт/м^2, что в 370 млрд раз меньше освещенности, создаваемой Солнцем. Расстояние до Полярной звезды составляет 200 пк, или около 650 св. лет ($r = 6 \cdot 10^{18}$ м). Поэтому светимость Полярной звезды $L_\text{П} = 4\pi r^2 E = 4 \cdot 3{,}14 \times$ $\times (6 \cdot 10^{18}\ \text{м})^2 \cdot 3{,}8 \cdot 10^{-9}\ \text{Вт/м}^2 = 9{,}1 \cdot 10^{29}\ \text{Вт} = 4600\ L_\odot$. Как видим, несмотря на малую видимую яркость этой звезды, ее светимость в 4600 раз превышает солнечную.

Измерения показали, что среди звезд встречаются звезды в сотни тысяч раз более мощные, чем Солнце, и звезды со светимостями в десятки тысяч раз меньшими, чем у Солнца.

Измерения температур поверхности звезд показали, что температура поверхности звезды определяет ее видимый цвет и наличие спектральных линий поглощения тех или иных химических элементов в ее спектре. Так, Сириус сияет белым цветом и его температура равна почти 10 000 К. Звезда Бетельгейзе (α Ориона) имеет красный цвет и температуру поверхности около 3500 К. Солнце желтого цвета имеет температуру 6000 К. По температуре, по цвету и виду спектра все звезды разбили на спектральные классы, которые обозначаются буквами O, B, A, F, G, K, M. Спектральная классификация звезд приведена ниже в таблице.

Имеется еще одна интересная связь между спектральным классом звезды и ее светимостью, которая представляется в виде диаграммы (рис. 16.2) «спектр — светимость (в светимостях Солнца)» (ее еще называют *диаграммой Герцшпрунга—Рессела* в честь двух астрономов — Э. Герцшпрунга и Г. Рессела, построивших ее). На диаграмме четко выделяются четыре группы звезд.

Главная последовательность. На нее ложатся параметры большинства звезд. К звездам главной последовательности относится и наше Солнце. Плотности звезд главной последовательности сравнимы с солнечной плотностью.

Красные гиганты. К этой группе в основном относятся звезды красного цвета с радиусами, в десятки раз превышаю-

щими солнечный, например звезда Арктур (α Волопаса), радиус которой превышает солнечный в 25 раз, а светимость — в 140 раз.

Сверхгиганты. Это звезды со светимостями, в десятки и сотни тысяч раз превышающими солнечную. Радиусы этих звезд в сотни раз превышают радиус Солнца. К сверхгигантам красного цвета относится Бетельгейзе (α Ориона). При массе примерно в 15 раз больше солнечной ее радиус превышает солнечный почти в 1000 раз. Средняя плотность этой звезды составляет всего $2 \cdot 10^{-11}$ кг/м^3, что более чем в 1 000 000 раз меньше плотности воздуха.

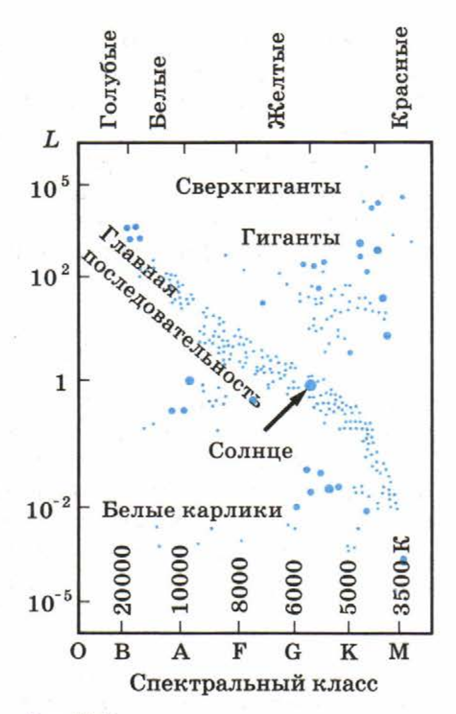


Рис. 16.2

Белые карлики. Это группа звезд в основном белого цвета со светимостями в сотни и тысячи раз меньше солнечной. Они расположены слева внизу диаграммы. Эти звезды имеют радиусы почти в сто раз меньше солнечного и по размерам сравнимы с планетами. Примером белого карлика служит звезда Сириус B — спутник Сириуса. При массе, почти равной солнечной, и размере, в 2,5 раза большем, чем размер Земли, эта звезда имеет гигантскую среднюю плотность — $\rho = 3 \cdot 10^8$ кг/м^3.

Спектральная классификация звезд

Спектральный класс	Цвет	Температура (К)	Примеры звезд
O	Голубой	30 000	Беллатрикс (γ Ориона)
B	Бело-голубой	20 000	Регул (α Льва)
A	Белый	10 000	Сириус
F	Желто-белый	8000	Альтаир (α Орла)
G	Желтый	6000	Солнце
K	Оранжевый	5000	Альдебаран (α Тельца)
M	Красный	3500	Бетельгейзе (α Ориона)

Чтобы понять, чем объясняются наблюдаемые отличия звезд разных групп, вспомним связь между светимостью, температурой и радиусом звезды, которую мы использовали для определения температуры Солнца (формула (16.3)).

Сравним две звезды спектрального класса К, одна — главной последовательности (ГП), другая — красный гигант (КГ). У них одинаковая температура — $T = 4500$ К, а светимости отличаются в тысячу раз:

$$\frac{L_{\text{КГ}}}{L_{\text{ГП}}} = \left(\frac{R_{\text{КГ}}}{R_{\text{ГП}}}\right)^2, \ \frac{R_{\text{КГ}}}{R_{\text{ГП}}} = \left(\frac{L_{\text{КГ}}}{L_{\text{ГП}}}\right)^{\frac{1}{2}} \approx \sqrt{1000} \approx 30,$$

т. е. красные гиганты в десятки раз больше по размерам, чем звезды главной последовательности.

Массы звезд удалось измерить только у звезд, входящих в состав двойных систем. И они определялись по параметрам орбит звезд и периоду их обращения вокруг друг друга с использованием третьего обобщенного закона Кеплера. Оказалось, что массы всех звезд лежат в пределах

$$0{,}05M_\odot \leqslant M \leqslant 100M_\odot$$

Для звезд главной последовательности имеется связь между массой звезды и ее светимостью: чем больше масса звезды, тем больше ее светимость.

$$L_з \approx L_\odot \left(\frac{M}{M_\odot}\right)^4. \qquad (16.4)$$

Так, звезда спектрального класса В имеет массу около $M \approx 20M_\odot$ и ее светимость почти в 100 000 раз больше солнечной.

Источник энергии Солнца и звезд. По современным представлениям, источником энергии, поддерживающим излучения Солнца и звезд, служит ядерная энергия, которая выделяется при термоядерных реакциях образования (синтеза) ядер атомов гелия из ядер атомов водорода. При реакции синтеза из четырех ядер атомов водорода (четырех протонов) образуется ядро атома гелия, при этом выделяется энергия $\Delta E = 4{,}8 \cdot 10^{-12}$ Дж, называемая **энергией связи**, две элементарные частицы нейтрино и два позитрона ($4H \rightarrow He + 2e^+ + 2\nu + \Delta E$).

Для протекания ядерных реакций необходима температура выше нескольких миллионов кельвинов, при которой участвующие в реакции протоны с одинаковыми зарядами смогли бы получить достаточную энергию для взаимного сближения, преодоления электрических сил отталкивания и слияния в одно новое ядро. В результате термоядер-

ных реакций синтеза из водорода массой 1 кг образуется гелий массой 0,99 кг, дефект масс $\Delta m = 0{,}01$ кг и выделяется энергия $q = \Delta mc^2 = 9 \cdot 10^{14}$ Дж.

Теперь можно оценить, на сколько времени хватит у Солнца запасов водорода, чтобы поддерживать наблюдаемое свечение Солнца, т. е. время жизни Солнца. Запас ядерной энергии $E = M_{\odot}q = 2 \cdot 10^{30} \cdot 9 \cdot 10^{14} = 1{,}8 \cdot 10^{45}$ Дж. Если поделить этот запас ядерной энергии на светимость Солнца $L_{\odot}$, то мы получим время жизни Солнца:

$$t_{\odot} = \frac{E}{L_{\odot}} = \frac{M_{\odot}q}{L_{\odot}} = \frac{1{,}8 \cdot 10^{45}\ \text{Дж}}{4 \cdot 10^{26}\ \text{Вт}} = 4{,}5 \cdot 10^{18}\ \text{с} = 1{,}5 \cdot 10^{11}\ \text{лет}.$$

Если учесть, что Солнце состоит по крайней мере на 70% из водорода и ядерные реакции протекают только в центре, в солнечном ядре, масса которого составляет около $0{,}1M_{\odot}$ и где температура достаточно высокая для протекания термоядерных реакций, то время жизни Солнца и звезд, похожих на Солнце, составит $t_{\odot} \approx 10^{10}$ лет. Солнце, по современным данным, существует уже около 5 млрд лет, так что ему еще жить и жить!

Термоядерные реакции синтеза гелия из водорода являются источником энергии звезд главной последовательности.

Определение спектров, цвета, температуры, светимости и масс звезд позволили классифицировать их по спектральным классам и обнаружить связь между спектральным классом и светимостью звезд, а также связь между их массой и светимостью.



1. **Перечислите основные группы звезд, которые выделяют на диаграмме «спектр — светимость».**
2. **Чем отличаются звезды одного спектрального класса, но принадлежащие разным группам?**

§ 122 ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ СОЛНЦА И ЗВЕЗД ГЛАВНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Строение Солнца. Мы не можем непосредственно заглянуть внутрь Солнца, поэтому представление о его внутреннем строении получаем только на основе теоретического анализа, используя наиболее общие законы физики и такие характеристики Солнца, как масса, радиус, светимость.

Солнце не расширяется и не сжимается, оно находится в гидростатическом равновесии, так как силе гравитации, стремящейся сжать Солнце, препятствует сила газового давления изнутри.

Расчеты показывают, что для поддержания гидростатического равновесия температура в центре Солнца должна быть примерно $15 \cdot 10^6$ К. На расстоянии $0,7R_\odot$ температура падает до порядка 10^6 К. Плотность вещества в центре Солнца около $1,5 \cdot 10^5$ кг/м^3, что более чем в 100 раз выше его средней плотности.

Термоядерные реакции протекают в центральной области Солнца радиусом, примерно равным $0,3R_\odot$. Эта область получила название **ядра**. Вне ядра температура недостаточна для протекания термоядерных реакций.

Энергия, выделившаяся в ядре Солнца, переносится наружу, к поверхности, двумя способами: лучистым и конвективным переносами. В первом случае энергия переносится излучением; во втором — при механических движениях нагретых масс вещества.

Лучистый перенос энергии происходит в ядре до расстояний $(0,6—0,7)\,R_\odot$ от центра Солнца, далее к поверхности энергия переносится конвекцией. Проявление конвекции наблюдается в виде грануляции в фотосфере. Полное время, которое требуется энергии, выделившейся в ядре, чтобы достигнуть поверхности Солнца, составляет около 10 млн лет. Так что тот свет и тепло, которые согревают и освещают нашу Землю сегодня, были выработаны в термоядерных реакциях в центре Солнца 10 млн лет назад.

Конечно, астрономы ищут способы заглянуть внутрь Солнца и проверить теоретические представления о его строении. На этом пути им на помощь пришли физики, изучающие элементарные частицы. Дело в том, что при термоядерных реакциях синтеза гелия из водорода наряду с выделением энергии происходит рождение элементарных частиц — нейтрино. В отличие от излучения нейтрино практически не задерживается веществом. Возникая в недрах Солнца и распространяясь со скоростью, близкой к скорости света, они через 2 с покидают поверхность Солнца и через 8 мин достигают Земли. Для наблюдений солнечных нейтрино был построен специальный нейтринный телескоп, который в течение многолетних наблюдений и зарегистрировал ожидаемый поток нейтрино от Солнца. Эти наблюдения окончательно подтвердили правильность наших теоретических моделей строения Солнца как звезды. Поэтому мы в полной мере можем использовать полученные результаты для разработки моделей других звезд. Другие звезды главной последовательности по строению во многом похожи на Солнце.

Красные гиганты и сверхгиганты. Отличительной особенностью этих звезд является отсутствие ядерных реакций в самом центре, несмотря на высокие температуры. Ядер-

ные реакции протекают в тонких слоях вокруг плотного центрального ядра. Так как температура звезды уменьшается к поверхности, то в каждом слое идет определенный тип термоядерных реакций. В самых внешних слоях ядра, где температура составляет около $15 \cdot 10^6$ К, из водорода образуется гелий; глубже, где температура выше, из гелия образуется углерод; далее из углерода — кислород, и в самых глубоких слоях у очень массивных звезд при термоядерных реакциях образуется железо. Более тяжелые химические элементы образовываться с выделением энергии не могут. Наоборот их образование требует затраты энергии. Итак, в красных гигантах и сверхгигантах формируются слоевые источники энергии и образуется большинство химических элементов вплоть до атомов железа.

Белые карлики. Эти звезды были названы белыми карликами, так как сначала среди них были обнаружены звезды белого цвета, а значительно позже — желтого и других цветов. Размеры их небольшие, всего лишь тысячи и десятки тысяч километров, т. е. сравнимые с размерами Земли. Но их массы близки к массе Солнца, и поэтому их средняя плотность сотни килограммов в кубическом сантиметре. Примером такой звезды служит спутник Сириуса, обозначаемый обычно как Сириус В. У этой звезды спектрального класса *A* с температурой 9000 К диаметр лишь в 2,5 раза превышает диаметр Земли, а масса равна солнечной, так что средняя плотность превышает 100 кг/см^3.

Пульсары и нейтронные звезды. В 1967 г. астрономы с помощью радиотелескопов обнаружили удивительные радиоисточники, которые испускали периодические импульсы радиоизлучения. Эти объекты получили название **пульсары**. Периоды импульсов пульсаров, которых сейчас известно свыше 400, заключены в пределах от нескольких секунд до 0,001 с. Удивляла высокая стабильность повторения импульсов; так, первый открытый пульсар, который обозначается как PSR 1919, расположенный в неприметном созвездии Лисички, имел период $T = 1{,}33\ 730\ 110\ 168$ с (рис. 16.3). Высокая стабильность периода, доступная только при измерении современными атомными часами, заставила вначале предположить, что астрономы имеют дело с сигналами, посылаемыми внеземными цивилизациями. В конце концов было доказано, что явление пульсации возникает в результате быстрого вращения нейтронных звезд, причем период следования импульсов равен периоду вращения нейтронной звезды.

Эти необычные звезды имеют радиусы около 10 км и массы, сравнимые с солнечной. Плотность нейтронной звезды фантастическая и равна $2 \cdot 10^{17}$ кг/м^3. Она сравнима с плот-

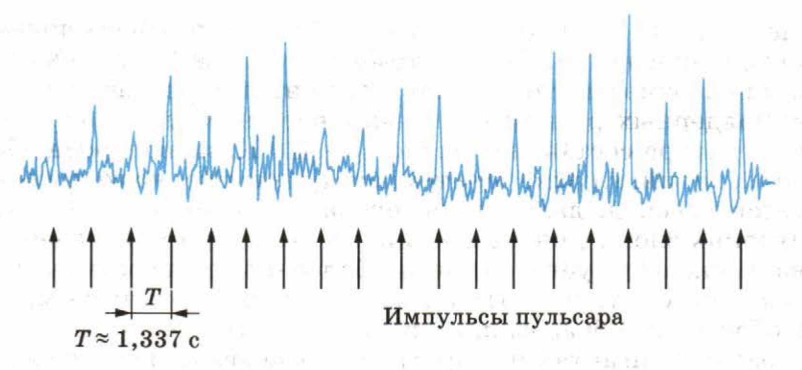


Рис. 16.3

ностью вещества в ядрах атомов. При такой плотности вещество звезды состоит из плотно упакованных нейтронов. По этой причине такие звезды получили название **нейтронных звезд**.

Черные дыры. В конце XVIII в. известный астроном и математик П. Лаплас (1749—1827) привел простые, основанные на теории тяготения Ньютона рассуждения, которые позволили предсказать существование необычных объектов, получивших название **черные дыры.** Известно, что для преодоления притяжения небесного тела массой M и радиусом R нужна вторая космическая (параболическая) скорость $v_2 = \sqrt{\frac{2GM}{R^2}}$. При меньшей скорости тело станет спутником небесного тела, при $v \geqslant v_2$ оно навсегда покинет небесное тело и никогда не вернется к нему. Для Земли $v_2 = 11{,}2$ км/с, на поверхности Солнца $v_2 = 617$ км/с. На поверхности нейтронной звезды массой, равной массе Солнца, и радиусом около 10 км $v_2 = 170\ 000$ км/с и составляет всего около 0,6 скорости света. Как видно из формулы, при радиусе небесного тела, равном $R = 2GM/c^2$, вторая космическая скорость будет равна скорости света $c = 300\ 000$ км/с. При еще меньших размерах вторая космическая скорость будет превышать скорость света. По этой причине даже свет не сможет покинуть такое небесное тело и дать информацию о процессах, происходящих на его поверхности, нам — далеким наблюдателям.

Если такие объекты во Вселенной существуют, то они являются как бы дырами, куда все проваливается и откуда ничего не выходит. Поэтому в современной литературе за ними укоренилось такое название — черные дыры.

В настоящее время обнаружены черные дыры в составе двойных звездных систем. Так, в созвездии Лебедя наблю-

дается тесная двойная система, одна из звезд, излучающая видимый свет, — обычная звезда спектрального класса B, другая — невидимая звезда малого размера — излучает рентгеновские лучи и имеет массу около $10M_{\odot}$. Эта невидимая звезда представляет собой черную дыру с размерами около 30 км. Рентгеновское излучение испускает не сама черная дыра, а нагретый до нескольких миллионов градусов диск, вращающийся вокруг черной дыры. Этот диск состоит из вещества, которое черная дыра своим тяготением вытягивает из яркой звезды (рис. XV на цветной вклейке).

Теоретические представления о внутреннем строении звезд главной последовательности были подтверждены прямыми наблюдениями потоков нейтрино из солнечного ядра.

В некоторых двойных звездных системах обнаружены черные дыры.



1. **Какие процессы теплопроводности переносят энергию от центра Солнца наружу?**
2. **Какие реакции служат источником энергии Солнца и звезд?**
3. **Как устроен красный гигант?**
4. **Что такое пульсары?**

§ 123 ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД: РОЖДЕНИЕ, ЖИЗНЬ И СМЕРТЬ ЗВЕЗД

В Млечном Пути наблюдаются газопылевые облака. Некоторые из них настолько плотные, что начинают сжиматься под действием собственного тяготения. По мере сжатия плотность и температура облака повышается, и оно начинает обильно излучать в инфракрасном диапазоне спектра. На этой стадии сжатия облако получило название **протозвезда**. Когда температура в недрах протозвезды повышается до нескольких миллионов кельвинов, в них начинаются термоядерные реакции превращения водорода в гелий и протозвезда превращается в обычную звезду главной последовательности. Продолжительность пребывания звезд на главной последовательности определяется мощностью излучения звезды (светимостью) и запасами ядерной энергии.

После выгорания водорода в недрах звезды она раздувается и становится красным гигантом или сверхгигантом в зависимости от массы.

Раздувшаяся оболочка звезды небольшой массы уже слабо притягивается ее ядром и, постепенно удаляясь от него, образует планетарную туманность (рис. X на цветной

вклейке). После окончательного рассеяния оболочки остается лишь горячее ядро звезды — белый карлик. От звезды типа Солнца останется углеродный белый карлик.

Эволюция массивных звезд происходит более бурно. В конце своей жизни такая звезда может взорваться сверхновой звездой, а ее ядро, резко сжавшись, превратиться в сверхплотный объект — нейтронную звезду или даже в черную дыру. Сброшенная оболочка, обогащенная гелием и другими тяжелыми элементами, образовавшимися в недрах звезды, рассеивается в пространстве и служит материалом для формирования звезд нового поколения. В частности, есть основания полагать, что Солнце — звезда второго поколения.

В процессе эволюции протозвезда переходит на стадию звезды главной последовательности, исчерпав водород в ядре, становится красным гигантом. Звезды типа Солнца становятся белыми карликами, а звезды с большими массами взрываются и становятся либо нейтронными звездами, либо черными дырами.



1. **Чем определяется время жизни звезды главной последовательности?**
2. **Чем предположительно станет Солнце в конце своей эволюции?**
3. **Что такое сверхновая звезда?**
4. **Что может остаться в конце эволюции массивной звезды?**

КРАТКИЕ ИТОГИ ГЛАВЫ 16

1. На Солнце наблюдается активность, которая имеет одиннадцатилетний цикл и влияет на жизненные процессы на Земле.
2. Звезды — раскаленные газовые шары, отличающиеся цветом, массой, светимостью и радиусом. Звезды по их спектрам и цвету разбиваются на спектральные классы. Наблюдается связь между светимостью и спектром звезд.
3. Солнце — ближайшая к нам звезда главной последовательности спектрального класса G, его светимость $L_{\odot} = 4 \cdot 10^{26}$ Вт, масса $M_{\odot} = 2 \cdot 10^{30}$ кг, температура поверхности $T_{\odot} = 6000$ К.
4. Источником энергии Солнца и звезд главной последовательности являются термоядерные реакции синтеза гелия из водорода, протекающие в центре звезды при температурах свыше 10^6 К.

   По мере исчерпания водорода в центре ядро звезды сжимается, а оболочка расширяется и охлаждается — звезда переходит в красный гигант или сверхгигант.

5. В дальнейшем звезда типа Солнца сбросит оболочку и будет наблюдаться планетарная туманность, а на месте звезды останется белый карлик.
Массивные звезды эволюционируют быстрее, взрываясь в конце жизни в виде сверхновой звезды. После взрыва может образоваться либо нейтронная звезда (пульсар), либо черная дыра.

Глава 17. СТРОЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ

Млечный Путь — наша Галактика представляет собой гигантскую спиральную галактику, заполненную звездами, звездными скоплениями, газом и пылью. Вместе с другими галактиками она является одним из крупнейших образований Вселенной. Узнаем, какие выводы о прошлом, настоящем и будущем видимой Вселенной можно сделать, исследуя галактики.

§ 124 МЛЕЧНЫЙ ПУТЬ — НАША ГАЛАКТИКА

При наблюдениях звездного неба вдали от крупных городов на нем в безлунную ночь хорошо видна широкая светящаяся полоса — Млечный Путь. Свое название Млечный Путь получил от древнегреческих мифов. Согласно одному из них Млечный Путь — это молоко, которое будто бы младенец Геркулес пролил, когда его кормила богиня Гера. Действительно, белесая полоса Млечного Пути напоминает пролитое молоко. Г. Галилей в конце 1610 г., наблюдая Млечный Путь в телескоп, установил, что он состоит из колоссального множества очень слабых звезд; его звездная структура хорошо видна даже в обычный бинокль.

Млечный Путь тянется серебристой полосой по обоим полушариям, замыкаясь в звездное кольцо. Наблюдения установили, что все звезды образуют огромную звездную систему, названную **Галактикой** (от греческого слова *галактикос* — молочный), подавляющее большинство звезд которой сосредоточено в Млечном Пути. Солнечная система входит в состав Галактики.

От созвездия Лебедя до созвездия Центавра Млечный Путь выглядит раздвоенным. Отсутствие звезд в темной части Млечного Пути объясняется наличием разреженной темной пылевой и газовой материи, концентрирующейся в пространстве к галактической плоскости. Эта материя поглощает и ослабляет свет далеких звезд.

Газ и пыль в Галактике распределены очень неоднородно. Помимо разреженных пылевых облаков, наблюдаются

плотные темные облака пыли. Когда эти плотные облака освещены яркими звездами, они отражают их свет, и тогда мы видим *отражательные туманности*, как те, что видны в скоплении звезд Плеяды. Если около газопылевого облака имеется горячая звезда, то она возбуждает свечение газа, и тогда мы видим *диффузную туманность*, примером которой служит Туманность Ориона (рис. XVII на цветной вклейке).

Примером диффузных туманностей особого типа служат *планетарные туманности*, названные так по тому как они выглядят в телескоп — похожие на планетные диски. Ярким примером планетарной туманности является туманность Кольцеобразная в созвездии Лиры (рис. X на цветной вклейке). В центре такой расширяющейся туманности находится звезда белый карлик, которая своим ультрафиолетовым излучением возбуждает свечение сброшенной оболочки. Планетарная туманность — «последний выдох» умирающей звезды типа нашего Солнца.

Исследования распределения звезд, газа и пыли показали, что наш Млечный Путь — Галактика представляет собой плоскую систему, имеющую спиральную структуру (рис. XIV на цветной вклейке). В Галактике около 100 млрд звезд. Среднее расстояние между звездами в Галактике около 5 св. лет. Но в центре Галактики, в ее ядре плотность звезд значительно выше и расстояния между звездами в сотни раз меньше, чем среднее. Центр Галактики, который расположен в созвездии Стрельца, скрыт от нас большим количеством газа и пыли, поглощающих свет звезд. Но в инфракрасном диапазоне, излучение которого газ и пыль поглощают плохо, ядро Галактики видно хорошо.

Мы находимся внутри Галактики, поэтому нам трудно представить ее внешний вид, но во Вселенной есть много других похожих галактик и по ним мы можем судить о нашем Млечном Пути. На рисунках XI и XII на цветной вклейке представлены спиральная галактика Водоворот и галактика Сомбреро, видимая с ребра. Темная полоса обусловлена наличием газа и пыли, которые концентрируются в плоскости галактики, как и в Млечном Пути.

Галактика вращается. Солнце, находящееся на расстоянии около 8 кпк (26 000 св. лет) от центра Галактики, обращается со скоростью около 220 км/с вокруг центра Галактики, совершая один оборот почти за 200 млн лет. Внутри орбиты Солнца сосредоточена материя массой около $10^{11}\ M_{\odot}$, а полная масса Галактики оценивается в несколько сотен миллиардов солнечных масс.

В настоящее время астрономы тщательно изучают центр нашей Галактики. Именно его свойства, процессы,

в нем происходящие, определяют структуру всей Галактики. Наблюдения за движением отдельных звезд около центра Галактики показали, что там, в небольшой области с размерами, сравнимыми с размерами Солнечной системы, сосредоточена невидимая материя, масса которой превышает массу Солнца в 2 млн раз. Это указывает на существование в центре Галактики массивной черной дыры.

Кроме звезд, газа и пыли, наша Галактика заполнена космическими лучами (релятивистскими частицами) — протонами, электронами и ядрами атомов других химических элементов, которые движутся со скоростями, близкими к скорости света. Под действием магнитного поля, которое тоже пронизывает всю Галактику, космические лучи двигаются по запутанным траекториям, не покидая Галактику. Релятивистские электроны космических лучей, двигаясь в магнитном поле, излучают радиоволны. Это радиоизлучение астрономы исследуют с помощью радиотелескопов, изучая распределение магнитного поля и космических лучей в Галактике.

Мы узнали, что серебристая полоса Млечного Пути представляет собой гигантскую спиральную галактику, что газ и пыль скрывают от нас центр Млечного Пути, где спрятана массивная черная дыра и все звезды, звездные скопления, газ и пыль обращаются вокруг этого центра.



1. **С какой скоростью обращается Солнце вокруг центра Галактики?**
2. **Что находится в центре Млечного Пути?**

§ 125 ГАЛАКТИКИ

В 20-х гг. XX в. было установлено, что объекты, называвшиеся ранее эллиптическими и спиральными туманностями, находятся за пределами нашей Галактики и являются самостоятельными звездными системами — галактиками (по числу входящих в них звезд они не уступают нашей звездной системе). Изучение строения галактик, их распределение и движение в пространстве имеет решающее значение для понимания законов эволюции всей части наблюдаемой нами Вселенной.

Число галактик, доступных наблюдениям в крупнейшие телескопы, достигает десятков миллиардов. Несмотря на исключительное многообразие внешнего вида, большинство галактик все же можно объединить в несколько основных типов: *эллиптические*, *спиральные*, *неправильные*.

К **эллиптическим** галактикам относятся те, которые имеют вид кругов или эллипсов. Их яркость плавно уменьшается от центра к периферии. Никакой внутренней структуры у этих галактик нет. Наблюдения показывают, что эти галактики не вращаются, в них очень мало газа и пыли. Массы самых крупных эллиптических галактик достигают $10^{13}\ M_{\odot}$.

Спиральные галактики состоят из ядра и нескольких спиральных рукавов, или ветвей. У обычных спиральных галактик эти ветви отходят непосредственно от ядра. У *пересеченных* спиральных галактик ядро пересекается по диаметру поперечной полосой — перемычкой (баром). От концов этой перемычки и начинаются спиральные ветви. Так, одна из ближайших к нам звездных систем, туманность Андромеды, является спиральной галактикой, а галактика NGC1300 — спиральная галактика с перемычкой (рис. XIX, XVIII на цветной вклейке). Считают, что наша Галактика похожа на туманность Андромеды.

Спиральные галактики вращаются, в них много газа и пыли, которые концентрируются к плоскости галактики в спиральных рукавах, в них много молодых горячих звезд спектральных классов O и B. Эти звезды возбуждают свечение диффузных газовых туманностей, разбросанных вместе с пылевыми облаками вдоль спиральных ветвей. Обилие газовых пылевых облаков и присутствие в них голубых звезд спектральных классов O и B говорят об активных процессах звездообразования, происходящих в спиральных рукавах этих галактик. Массы спиральных галактик составляют от 10^{10} до $10^{12}\ M_{\odot}$.

К **неправильным** галактикам относятся те, у которых отсутствует четко выраженное ядро и не обнаружена вращательная симметрия. Примерами неправильных галактик служат Большое Магелланово Облако и Малое Магелланово Облако — самые близкие к нам галактики, видимые невооруженным глазом в южном полушарии неба, вблизи Млечного Пути. Эти две галактики являются спутниками нашей Галактики.

Специальный класс галактик представляют *взаимодействующие* галактики. Обычно это двойные галактики, между которыми наблюдаются светлые перемычки, «хвосты» и т. д.

Активные галактики и квазары. В ядрах некоторых галактик происходят бурные процессы, такие галактики получили название **активных** галактик. Так, в галактике M87 в созвездии Девы наблюдается яркий выброс вещества со скоростью около 3000 км/с, масса этого выброса состав-

ляет примерно $10^5\ M_\odot$. Эта галактика оказалась мощным источником радиоизлучения.

Радионаблюдения галактик показали, что большинство из них являются слабыми источниками радиоизлучения, основная доля их излучения приходится на свет звезд галактики. Однако существуют такие галактики, радиоизлучение которых не только сравнимо, но и значительно превышает их оптическое излучение. Эти галактики получили название *радиогалактик*. На рисунке XVI цветной вклейки показана фотография одной из мощнейших радиогалактик Центавр А. На фотографии видно, что галактика пересечена мощной полосой поглощающего вещества.

Анализ свойств радиоизлучения показывает, что оно вызывается облаками горячей плазмы, выброшенной из ядра галактики. Облака горячей плазмы движутся со скоростью, близкой к скорости света.

Еще более мощными источниками радиоизлучения являются **квазары**, полное название которых — квазизвездные (почти звездообразные) радиоисточники. Примером такого источника является ближайший к нам квазар С273 в созвездии Девы. Его светимость достигает $10^{12}\ L_\odot$. Светимости большинства квазаров в десятки и сотни раз превышают светимости обычных галактик. Квазары являются также мощными источниками инфракрасного, рентгеновского и гамма-излучения. А вот размеры квазаров оказались небольшими, около 1 а. е., т. е. всего лишь в десятки раз больше размеров Солнечной системы. Тщательные исследования показали, что квазары представляют собой активные ядра галактик, структура которых пока недоступна современной технике наблюдений.

По современным представлениям, в ядрах галактик, как и в ядре нашей Галактики, находятся массивные черные дыры. Поэтому наиболее разработанной моделью квазара является модель с массивной черной дырой, расположенной в центре определенного типа галактик с высокой звездной плотностью. Длительное и мощное энерговыделение может быть полностью объяснено выпадением вещества галактики на черную дыру. Масса такой черной дыры составляет около $10^8\ M_\odot$, а ее радиус $3 \cdot 10^8$ км. Находясь в центре галактики с высокой звездной плотностью, такая черная дыра может захватывать целые звезды. Для обеспечения наблюдаемой светимости квазаров достаточно, чтобы черная дыра захватывала хотя бы одну звезду в год. При высоких плотностях звезд в ядрах галактик такие частые захваты звезд черной дырой вполне реальны.

В обычных галактиках плотности звезд в ядре невелики, поэтому такие захваты звезд редки, и мы не видим проявлений большой активности у обычных галактик.

Скопления галактик. Известно, что диаметр нашей Галактики достигает почти 30 кпк (100 000 св. лет), диаметр галактики Андромеды (М31) — 40 кпк. Расстояние от нас до туманности Андромеды составляет 670 кпк (2 млн св. лет), следовательно, превышает диаметры крупных галактик почти в 20 раз. Среднее же расстояние между звездами примерно такое же, как между Солнцем и звездой α Центавра, т. е. около 275 000 а. е., и больше диаметра Солнца ($1{,}5 \cdot 10^6$ км $= 0{,}01$ а. е.) примерно в 27,5 млн раз. Таким образом, галактики значительно теснее сближены в пространстве, чем звезды между собой.

Систематические исследования распределения галактик по небу показали, что наряду с отдельными галактиками наблюдаются скопления галактик. Так, наша Галактика, туманность Андромеды, Большое и Малое Магеллановы Облака и еще несколько звездных систем образуют *Местную группу*, в которую входят 35 галактик. Галактики Местной группы связаны общим тяготением и движутся вокруг общего центра масс.

Сейчас известно около 4000 скоплений галактик, в которых насчитываются сотни и тысячи звездных систем. В среднем диаметры скоплений близки к 8 Мпк (26 млн св. лет). Одним из наибольших является скопление галактик в созвездии Волосы Вероники. Оно находится на расстоянии около 70 Мпк от нас. В этом богатом скоплении насчитывается около 40 000 галактик.

Наш Млечный Путь вместе с Местной группой галактик расположен на окраине скопления галактик, центр которого находится в созвездии Дева.

Красное смещение в спектрах галактик и закон Хаббла. Свет галактик в основном представляет собой суммарный свет миллиардов звезд и газа. Для изучения физических свойств галактик астрономы используют методы спектрального анализа света.

Наблюдения показывают, что линии в спектрах всех известных галактик смещены к красному концу спектра. Это явление было названо **красным смещением**. При этом отношение смещения спектральной линии $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$ к длине волны λ_0 оказалось для всех линий одинаковым в спектре данной галактики. Отношение $z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$, где λ_0 — длина волны спектральной линии, наблюдаемой в лаборатории, характеризует красное смещение.

Общепринятая в настоящее время интерпретация этого явления связана с эффектом Доплера, согласно которому смещение спектральных линий вызвано движением (удалением) излучающего объекта (галактики) со скоростью v по направлению от наблюдателя. При малых красных смещениях ($z \ll 1$) скорость объекта может быть найдена по формуле Доплера:

$$v = c\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = cz, \qquad (17.1)$$

где $c = 3 \cdot 10^5$ км/с — скорость света.

После того как по красному смещению были найдены расстояния до галактик, известный астроном Э. Хаббл установил интересную зависимость, названную ***законом Хаббла: скорости удаления галактик возрастают прямо пропорционально расстоянию до них***:

$$v = Hr. \qquad (17.2)$$

В этой формуле коэффициент пропорциональности H называется постоянной Хаббла. Ее числовое значение зависит от выбранных единиц измерения. Если в законе Хаббла скорость выражена в километрах в секунду, а расстояние — в мегапарсеках, то постоянная Хаббла H = 75 км/(с · Мпк).

Используя закон Хаббла, удается измерить расстояния до галактик по их красному смещению.

Так, самый близкий к нам квазар 3С273 имеет красное смещение $z = 0{,}158$. Это означает, что он удаляется от нас со скоростью $v = cz = 3 \cdot 10^5 \cdot 0{,}158 = 47\,400$ (км/с). Из закона Хаббла следует, что расстояние до него $r = v/H =$ = 632 Мпк = 2 млрд св. лет.

Самые большие объекты во Вселенной — галактики представляют собой гигантские звездные острова, похожие и не похожие на наш Млечный Путь. По спектрам галактик установили, что они разбегаются от нас со скоростью, пропорциональной расстоянию до галактики.



1. Перечислите основные типы галактик
2. Что такое красное смещение?
3. С помощью какого эффекта объясняют красное смещение в спектрах галактик?
4. Сформулируйте закон Хаббла.

§ 126 СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ

Наука, изучающая строение и эволюцию Вселенной, называется **космологией** (от греческих слов *космос* — мир, Вселенная и *логос* — учение).

Большое значение для развития современных представлений о строении и развитии Вселенной имеет общая теория относительности, созданная А. Эйнштейном (1879— 1955). Она обобщает теорию тяготения Ньютона на большие массы вещества и скорости его движения, сравнимые со скоростью света. Действительно, в галактиках сосредоточена колоссальная масса вещества, а скорости далеких галактик и квазаров сравнимы со скоростью света. Согласно общей теории относительности, гравитационное взаимодействие передается с конечной скоростью, равной скорости света. (В теории Ньютона считается, что гравитационное взаимодействие передается мгновенно.)

Общая теория относительности накладывает определенные ограничения на геометрические свойства пространства, которое уже нельзя считать евклидовым. Согласно этой теории, движение и распределение материи в пространстве нельзя рассматривать в отрыве от геометрических свойств пространства и времени.

Расширяющаяся Вселенная. Впервые космологическую модель Вселенной в рамках общей теории относительности рассмотрел советский математик А. Фридман. Он показал, что Вселенная, однородно заполненная веществом, должна быть нестационарной, и исходя из этого объяснил наблюдаемую картину разбегания галактик. Он показал, что в зависимости от средней плотности вещества Вселенная должна либо расширяться, либо сжиматься. При расширении Вселенной скорость разбегания галактик должна быть пропорциональна расстоянию до них — вывод, который подтвердил Хаббл открытием красного смещения в спектрах галактик.

Критическое значение плотности вещества, от которой зависит характер его движения:

$$\rho_{кр} = \frac{3H^2}{8\pi G}, \qquad (17.3)$$

где G — гравитационная постоянная, а H — постоянная Хаббла.

Помня, что 1 пк = $3{,}08 \cdot 10^{13}$ км и поэтому 1 Мпк = $= 3{,}08 \cdot 10^{19}$ км, найдем $H = 2{,}4 \cdot 10^{-18}$ с$^{-1}$. Тогда согласно формуле (17.3) критическая плотность вещества:

$$\rho_{кр} = \frac{3(2{,}4 \cdot 10^{-18}\ с^{-1})^2}{8 \cdot 3{,}14 \cdot 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ м^3/(кг \cdot с^2)} = 10^{-26}\ кг/м^3,$$

или

$$\rho_{кр} = 10^{-29}\ г/см^3.$$

Если средняя плотность Вселенной больше критической ($\rho > \rho_{кр}$), то в будущем расширение Вселенной сменится сжатием, а при средней плотности, равной или меньшей критической ($\rho \leqslant \rho_{кр}$), расширение не прекратится.

Средняя плотность вещества, сосредоточенная в виде звезд в галактиках, равна приблизительно $2 \cdot 10^{-30}$ кг/см^3, что почти в 5 раз меньше критической.

Но делать выводы о бесконечном расширении Вселенной пока преждевременно, так как некоторые астрономы высказывают предположение о существовании в галактиках вещества, которое пока еще не обнаружено. Эта «скрытая масса» может изменить оценку принятой сейчас средней плотности вещества во Вселенной. Поэтому точного ответа на вопрос о будущем Вселенной в настоящее время не имеется.

Радиус Вселенной легко оценить с помощью закона Хаббла. Так как максимальная скорость не может превышать скорости света, то максимальное расстояние R, до которого мы можем наблюдать небесные тела, соответствует скорости разбегания галактик $v = c = 3 \cdot 10^5$ км/с, откуда

$$R = \frac{c}{H} = \frac{3 \cdot 10^5 \text{ км/с}}{75 \text{ км/(с} \cdot \text{Мпк)}} = 4 \cdot 10^3 \text{ Мпк} = 1{,}3 \cdot 10^{10} \text{ св. лет},$$

или $R = 1{,}24 \cdot 10^{26}$ м.

Возраст Вселенной. Если наблюдения пока не позволяют нам с определенностью сказать о характере будущего расширения Вселенной, то оценить, когда в прошлом это расширение началось, можно с помощью закона Хаббла. Действительно, если наблюдаемая нами галактика удаляется со скоростью v и сейчас после «начала» расширения находится на расстоянии r от Земли, то свое удаление она начала в момент

$$t = \frac{r}{v} = \frac{r}{Hr} = \frac{1}{H} = \frac{1}{2{,}4 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1}} = 0{,}42 \cdot 10^{18} \text{ с} = 13 \cdot 10^9 \text{ лет}.$$

Эти рассуждения применимы для любой галактики. Таким образом, около 13 млрд лет назад все вещество метагалактики было сосредоточено в небольшом объеме и плотность вещества была настолько высокой, что ни галактик, ни звезд не существовало. Пока не ясны ни физические процессы, протекавшие до этого сверхплотного состояния вещества, ни причины, вызвавшие расширение Вселенной. Ясно одно, что со временем расширение привело к значительному уменьшению плотности вещества и на определенном этапе расширения стали формироваться галактики и звезды.

Некоторые видят в наблюдаемом разбегании галактик аналогию с разлетом вещества во время взрыва, поэтому описанная теория расширения Вселенной получила название **теории Большого взрыва**, а время (13 млрд лет), прошедшее с начала этого взрыва, называют *возрастом Вселенной*.

Модель «горячей Вселенной». В 1968 г. было обнаружено излучение, которое не связано ни с одним известным источником радиоизлучения. Оно идет со всех сторон и похоже на излучение абсолютно черного тела. Это микроволновое излучение имеет максимум на длине волны $\lambda_{max} = 1$ мм, что, согласно закону смещения Вина, соответствует температуре излучения 2,7 К. В прошлом, на ранних этапах эволюции Вселенной, плотность и температура этого излучения были существенно выше. Таким образом, в прошлом не только плотность, но и температура вещества были очень высокими. Так, например, когда возраст Вселенной был всего несколько секунд, температура вещества и излучения была десятки и сотни миллионов кельвинов. Конечно, ни о каких галактиках и звездах в этот период говорить не приходится. Они образовались значительно позднее, когда температура и плотность вещества стали ниже. Так как наблюдаемое микроволновое излучение с температурой 2,7 К связано с горячим веществом на ранних этапах эволюции Вселенной, то излучение получило название **реликтового** (оставшегося от прошлых эпох), а модель расширяющейся Вселенной называют **моделью «горячей Вселенной»**.

КРАТКИЕ ИТОГИ ГЛАВЫ 17

1. Млечный Путь — Галактика — рядовая спиральная галактика, состоящая из сотен миллиардов звезд и имеющая в поперечнике около 30 кпк (около 100 000 световых лет).
2. Солнце находится на расстоянии около 8 кпк от центра Галактики, в котором, по современным представлениям, находится массивная черная дыра массой, превышающей $5 \cdot 10^6 M_{\odot}$.
3. Наряду со спиральными галактиками существуют эллиптические и неправильные галактики.
   Спиральные галактики вращаются, и в них много газа, пыли и молодых горячих звезд.
   Эллиптические галактики не вращаются, в них отсутствуют газ и пыль, и они состоят в основном из старых звезд.

4. В спектрах галактик наблюдается красное смещение спектральных линий, что указывает на их удаление от нас. Скорость удаления и расстояние до галактики связаны законом Хаббла: $v = Hr$.
5. Наблюдаемое разбегание галактик объясняется расширением Вселенной. Время примерно 13 млрд лет — возраст Вселенной, а радиус Вселенной примерно 4000 Мпк. Наблюдение реликтового излучения с температурой $T \approx 2{,}7$ К указывает на то, что в прошлом Вселенная была не только плотной, но и горячей.



ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

1. Определите массу Юпитера по движению его спутника Ио, если спутник обращается вокруг Юпитера по круговой орбите на расстоянии $a = 422 \cdot 10^3$ км, с периодом $T = 1{,}769$ сут.

Решение. Из третьего обобщенного закона Кеплера (15.3), полагая $M_{Ю} = M_1 \gg M_2 = M_{Ио}$, имеем $M_{Ю} = \frac{4\pi^2 a^3}{GT^2}$, тогда $M_{Ю} = 1{,}9 \cdot 10^{27}$ кг.

2. Во сколько раз звезда сверхгигант со светимостью в 10 000 $L_{\odot}$ больше, чем звезда главной последовательности, если их температуры одинаковы и равны 5800 К?

Решение. Звезда главной последовательности с данной температурой — Солнце. Так как $L = \sigma T^4 4\pi R^2$, то отношение радиусов

$$\frac{R_{сг}}{R_{гп}} = \sqrt{\frac{L_{сг}}{L_{гп}}} = 100.$$



УПРАЖНЕНИЕ 15

1. Определите массу Марса по движению его спутника Деймоса, среднее расстояние которого до планеты $a = 23\,000$ км, период обращения 1,26 сут.

2. Во время великого противостояния Марса, когда он сблизился с Землей на расстояние 0,4 а. е., измеренный угловой диаметр Марса был равен 23″. Определите линейный диаметр Марса.

3. Когда Земля (4 января) находится в перигелии, Солнце движется по небу с угловой скоростью 61′ в сутки, а 4 июля, когда Земля в афелии, — 57′ в сутки. Определите эксцентриситет земной орбиты.

4. Во время вспышки на Солнце было выброшено облако плазмы со скоростью 1000 км/с. За какое время облако плазмы, двигаясь с постоянной скоростью, достигнет Земли?

ЗНАЧЕНИЕ ФИЗИКИ ДЛЯ ОБЪЯСНЕНИЯ МИРА И РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ СИЛ ОБЩЕСТВА

§ 127 ЕДИНАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ КАРТИНА МИРА

Итак, изучение школьного курса физики вами закончено. В большей или меньшей степени каждый из вас приобщился к результатам той огромной работы по изучению различных форм движения материи, строения и свойств материальных тел, которая была проделана на протяжении многих веков учеными всего мира. Физика знакомит нас с наиболее общими законами природы, управляющими течением процессов в окружающем нас мире и во Вселенной в целом.

Цель физики заключается в отыскании общих законов природы и в объяснении конкретных процессов на их основе. По мере продвижения к этой цели перед учеными постепенно вырисовывалась величественная и сложная картина единства природы. Мир представляет собой не совокупность разрозненных, независимых друг от друга событий, а разнообразные и многочисленные проявления одного целого.

Механическая картина мира. Многие поколения ученых поражала и продолжает поражать величественная и цельная картина мира, которая была создана на основе механики Ньютона. Согласно Ньютону весь мир состоит «из твердых, весомых, непроницаемых, подвижных частиц». Эти «первичные частицы абсолютно тверды: они неизмеримо более тверды, чем тела, которые из них состоят, настолько тверды, что они никогда не изнашиваются и не разбиваются вдребезги». Отличаются они друг от друга главным образом количественно, своими массами. Все богатство, все качественное многообразие мира — это результат различий в движении частиц. Внутренняя сущность частиц остается на втором плане.

Основанием для такой единой картины мира послужил всеобъемлющий характер открытых Ньютоном законов движения тел. Этим законам с удивительной точностью подчиняются как громадные небесные тела, так и мельчайшие песчинки, гонимые ветром. И даже ветер — движение невидимых глазом частиц воздуха — подчиняется тем же

законам. На протяжении долгого времени ученые были уверены, что единственными фундаментальными законами природы являются законы механики Ньютона. Французский ученый Лагранж считал, что «нет человека счастливее Ньютона: «...ведь только однажды одному человеку суждено построить картину мира».

Однако простая механическая картина мира оказалась несостоятельной. При исследовании электромагнитных процессов выяснилось, что они не подчиняются механике Ньютона. Дж. Максвелл открыл новый тип фундаментальных законов, которые не сводятся к механике Ньютона, — это законы поведения электромагнитного поля.

Электромагнитная картина мира. В механике Ньютона предполагалось, что тела непосредственно через пустоту действуют друг на друга и эти взаимодействия осуществляются мгновенно (теория дальнодействия). После создания электродинамики представления о силах существенно изменились. Каждое из взаимодействующих тел создает электромагнитное поле, которое с конечной скоростью распространяется в пространстве. Взаимодействие осуществляется посредством этого поля (теория близкодействия).

Электромагнитные силы чрезвычайно широко распространены в природе. Они действуют в атомном ядре, атоме, молекуле, между отдельными молекулами в макроскопических телах. Это происходит потому, что в состав всех атомов входят электрически заряженные частицы. Действие электромагнитных сил обнаруживается и на очень малых (ядро), и на космических (электромагнитное излучение звезд) расстояниях.

Развитие электродинамики привело к попыткам построить *единую электромагнитную картину мира*. Все события в мире по этой картине управляются законами электромагнитных взаимодействий.

Кульминации электромагнитная картина мира достигла после создания специальной теории относительности. Было понято фундаментальное значение конечности скорости распространения электромагнитных взаимодействий, создано новое учение о пространстве и времени, найдены релятивистские уравнения движения, заменяющие уравнения Ньютона при больших скоростях.

Если во времена расцвета механической картины мира делались попытки свести электромагнитные явления к механическим процессам в особой среде (мировом эфире), то теперь уже стремились, наоборот, вывести законы движения частиц из электромагнитной теории. Частицы вещества пытались рассматривать как «сгустки» электро-

магнитного поля. Однако свести все процессы в природе к электромагнитным не удалось. Уравнения движения частиц и закон гравитационного взаимодействия не могут быть выведены из теории электромагнитного поля. Кроме того, были открыты электрически нейтральные частицы и новые типы взаимодействий. Природа оказалась сложнее, чем предполагали вначале: ни единый закон движения, ни единственная сила не способны охватить всего многообразия процессов в мире.

Единство строения материи. Мир чрезвычайно разнообразен. Но как это ни удивительно, вещество звезд точно такое же, как и вещество, из которого состоит Земля. Атомы, из которых состоят все тела Вселенной, совершенно одинаковы. Живые организмы состоят из тех же атомов, что и неживые.

Все атомы имеют одинаковую структуру и построены из элементарных частиц трех видов. У них есть ядра из протонов и нейтронов, окруженные электронами. Ядра и электроны взаимодействуют друг с другом посредством электромагнитного поля, квантами которого являются фотоны.

Взаимодействие же между протонами и нейтронами в ядре осуществляют в основном те мезоны, которые представляют собой кванты ядерного поля. При распаде нейтронов появляются нейтрино. Кроме того, открыто много других элементарных частиц. Но только при взаимодействии частиц очень больших энергий они начинают играть заметную роль.

В первой половине XX в. был открыт фундаментальный факт: *все элементарные частицы способны превращаться друг в друга.*

В 70-е гг. было установлено, что все сильно взаимодействующие частицы состоят из субэлементарных частиц — кварков шести видов. Истинно элементарными частицами являются лептоны и кварки.

После открытия элементарных частиц и их превращений на первый план единой картины мира выступило *единство в строении материи.*

В основе этого единства лежит материальность всех элементарных частиц. *Различные элементарные частицы* — это *различные конкретные формы существования материи.*

Современная физическая картина мира. Единство мира не исчерпывается единством строения материи. Оно проявляется и в законах движения частиц, и в законах их взаимодействия.

Несмотря на удивительное разнообразие взаимодействий тел друг с другом, в природе, по современным данным, имеются лишь четыре типа сил. Это *гравитационные силы*, *электромагнитные*, *ядерные* и *слабые взаимодействия*. Последние проявляются главным образом при превращениях элементарных частиц друг в друга. С проявлением всех четырех типов сил мы встречаемся в безграничных просторах Вселенной, в любых телах на Земле (в том числе и в живых организмах), в атомах и атомных ядрах, при всех превращениях элементарных частиц.

Революционное изменение классических представлений о физической картине мира произошло после открытия квантовых свойств материи. С появлением квантовой физики, описывающей движение микрочастиц, начали вырисовываться новые элементы единой физической картины мира.

Разделение материи на вещество, имеющее прерывное строение, и непрерывное поле потеряло абсолютный смысл. Каждому полю соответствуют кванты этого поля: электромагнитному полю — фотоны, ядерному — мезоны, а на более глубоком уровне — глюоны, осуществляющие взаимодействие кварков.

В свою очередь, все частицы обладают волновыми свойствами. Корпускулярно-волновой дуализм присущ всем формам материи.

Описание, казалось бы, взаимоисключающих корпускулярных и волновых свойств в рамках одной теории оказалось возможным благодаря тому, что законы движения всех без исключения микрочастиц носят статистический (вероятностный) характер. Этот факт делает невозможным однозначное предсказание того или иного поведения микрообъектов.

Принципы квантовой теории являются совершенно общими, применимыми для описания движения всех частиц, взаимодействий между ними и их взаимных превращений.

Итак, современная физика, несомненно, демонстрирует нам черты единства природы. Но все же многого, быть может, даже саму физическую суть единства мира выяснить пока еще не удалось.

Неизвестно, почему существует столь много различных элементарных частиц, почему они имеют те или иные значения массы, заряда и других характеристик. До сих пор все эти величины определяются экспериментально.

Однако все отчетливее вырисовывается связь между различными типами взаимодействий. Электромагнитные и слабые взаимодействия уже объединены в рамках одной

теории. Выяснена структура большинства элементарных частиц.

«Здесь скрыты столь глубокие тайны и столь возвышенные мысли, что, несмотря на старания сотен остроумнейших мыслителей, трудившихся в течение тысяч лет, еще не удалось проникнуть в них, и радость творческих исканий и открытий все еще продолжает существовать». Эти слова, сказанные Галилеем три с половиной столетия назад, нисколько не устарели.

Научное мировоззрение. Фундаментальные законы, устанавливаемые в физике, по своей сложности и общности намного превосходят те факты, с которых начинается исследование любых явлений. Но они столь же достоверны и объективны, как и знания о простых явлениях, наблюдаемых непосредственно. Эти законы не нарушаются никогда, ни при каких условиях.

Все большее и большее число людей осознают, что объективные законы, которым следует природа, исключают чудеса, а познание этих законов позволит человечеству выжить.



ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ[1]

1. НАБЛЮДЕНИЕ ДЕЙСТВИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ТОК

Оборудование: проволочный моток, штатив, источник постоянного тока, реостат, ключ, соединительные провода, дугообразный магнит.

Подготовка к проведению работы

Подвесьте проволочный моток к штативу, подсоедините его к источнику тока последовательно с реостатом и ключом. Предварительно ключ должен быть разомкнут, движок реостата установлен на максимальное сопротивление.

Проведение эксперимента

1. Поднесите к висящему мотку магнит и, замыкая ключ, пронаблюдайте движение мотка.

2. Выберите несколько характерных вариантов относительного расположения мотка и магнита и зарисуйте их, указав направление магнитного поля, направление тока и предполагаемое движение мотка относительно магнита.

3. Проверьте на опыте правильность предположений о характере и направлении движения мотка.

2. ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Оборудование: миллиамперметр, источник питания, катушки с сердечниками, дугообразный магнит, выключатель кнопочный, соединительные провода, магнитная стрелка (компас), реостат.

Подготовка к проведению работы

1. Вставьте в одну из катушек железный сердечник, закрепив его гайкой. Подключите эту катушку через миллиамперметр, реостат и ключ к источнику питания. Замкните ключ и с помощью магнитной стрелки (компаса) определите расположение магнитных полюсов катушки с током. Зафиксируйте, в какую сторону отклоняется при этом стрелка миллиамперметра. В дальнейшем при выполнении работы можно будет судить о расположении магнитных полюсов катушки с током по направлению отклонения стрелки миллиамперметра.

---

[1] Инструкции к лабораторным работам составлены А. Б. Долицким и А. З. Сивяковым при участии Ю. И. Дика и Г. Г. Никифорова.

2. Отключите от цепи реостат и ключ, замкните миллиамперметр на катушку, сохранив порядок соединения их клемм.

Проведение эксперимента

1. Приставьте сердечник к одному из полюсов дугообразного магнита и вдвиньте внутрь катушки, наблюдая одновременно за стрелкой миллиамперметра.

2. Повторите наблюдение, выдвигая сердечник из катушки, а также меняя полюса магнита.

3. Зарисуйте схему опыта и проверьте выполнение правила Ленца в каждом случае.

4. Расположите вторую катушку рядом с первой так, чтобы их оси совпадали.

5. Вставьте в обе катушки железные сердечники и присоедините вторую катушку через выключатель к источнику питания.

6. Замыкая и размыкая ключ, наблюдайте отклонение стрелки миллиамперметра.

7. Зарисуйте схему опыта и проверьте выполнение правила Ленца.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ МАЯТНИКА

Оборудование: часы с секундной стрелкой, измерительная лента с погрешностью $\Delta_л = 0{,}5$ см, шарик с отверстием, нить, штатив с муфтой и кольцом.

Подготовка к проведению работы

Для измерения ускорения свободного падения применяются разнообразные гравиметры, в частности маятниковые приборы. С их помощью удается измерить ускорение свободного падения с абсолютной погрешностью порядка 10^{-5} м/с^2.

В работе используется простейший маятник — шарик на нити. При малых размерах шарика по сравнению с длиной нити и небольших отклонениях от положения равновесия период колебаний равен периоду колебаний математического маятника $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$. Для увеличения точности измерения периода нужно измерить время t достаточно большого числа N полных колебаний маятника. Тогда период $T = \frac{t}{N}$, и ускорение свободного падения может быть вычислено по формуле $g = 4\pi^2 \frac{lN^2}{t^2}$.

Проведение эксперимента

1. Установите на краю стола штатив. У его верхнего конца укрепите с помощью муфты кольцо и подвесьте к нему шарик на нити. Шарик должен висеть на расстоянии 1—2 см от пола.

2. Измерьте лентой длину l маятника (длина маятника должна быть не менее 50 см).

3. Возбудите колебания маятника, отклонив шарик в сторону на 5—8 см и отпустив его.

4. Измерьте в нескольких экспериментах время t 50 колебаний маятника и вычислите $t_{ср}$: $t_{ср} = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + \ldots}{n}$, где n — число опытов по измерению времени.

5. Вычислите среднюю абсолютную погрешность измерения времени

$$\Delta t_{ср} = \frac{|t_1 - t_{ср}| + |t_2 - t_{ср}| + |t_3 - t_{ср}| + \ldots}{n}$$

и результаты занесите в таблицу.

Номер опыта	t, с	$t_{ср}$, с	Δt, с	$\Delta t_{ср}$, с	l, м
1					
2					
3					
4					
5					
6					

6. Вычислите ускорение свободного падения по формуле

$$g_{ср} = 4\pi^2 \frac{lN^2}{t_{ср}^2}.$$

7. Определите относительную погрешность измерения времени ε_t.

8. Определите относительную погрешность измерения длины маятника $\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l}$. Значение Δl складывается из погрешности мерной ленты и погрешности отсчета, равной половине цены деления ленты: $\Delta l = \Delta l_л + \Delta l_{отсч}$.

9. Вычислить относительную погрешность измерения g по формуле

$$\varepsilon_g = \varepsilon_l + 2\varepsilon_\pi + 2\varepsilon_t,$$

учитывая, что погрешностью округления π можно пренебречь, если $\pi = 3{,}14$; также можно пренебречь ε_l, если она в 4 раза (и более) меньше $2\varepsilon_t$.

10. Определите $\Delta g = \varepsilon_g g_{ср}$ и запишите результат измерения в виде

$$g_{ср} - \Delta g \leqslant g \leqslant g_{ср} + \Delta g.$$

Убедитесь в достоверности измерений и проверьте принадлежность известного значения g полученному интервалу.

4. ИЗМЕРЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СТЕКЛА

Оборудование, необходимые измерения. В работе измеряется показатель преломления стеклянной пластины, имеющей форму трапеции. На одну из параллельных граней пластины наклонно к ней направляют узкий световой пучок. Проходя через пластину, этот пучок света испытывает двукратное преломление. Источником света служит электрическая лампочка, подключенная через ключ к какому-либо источнику тока. Световой пучок создается с помощью металлического экрана с щелью. При этом ширина пучка может меняться за счет изменения расстояния между экраном и лампочкой.

Показатель преломления стекла относительно воздуха определяется по формуле

$$n = \frac{\sin\alpha}{\sin\beta},$$

где α — угол падения пучка света на грань пластины (из воздуха в стекло); β — угол преломления светового пучка в стекле.

Для определения отношения, стоящего в правой части формулы, поступают следующим образом. Перед тем как направить на пластину световой пучок, ее располагают на столе на листе миллиметровой бумаги (или листе бумаги в клетку) так, чтобы одна из ее параллельных граней совпала с предварительно отмеченной линией на бумаге. Эта линия укажет границу раздела сред воздух — стекло. Тонко очиненным карандашом проводят линию вдоль второй параллельной грани. Эта линия изображает границу раздела сред стекло — воздух. После этого, не смещая пластины, на ее первую параллельную грань направляют узкий световой пучок под каким-либо углом к грани. Вдоль падающего на пластину и вышедшего из нее световых пучков тонко очиненным карандашом ставят точки *1*, *2*, *3* и *4* (рис. 18.1). После этого лампочку выключают, пластину снимают и с помощью линейки прочерчивают входящий, выходящий

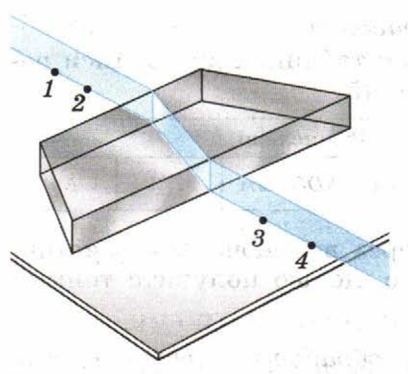


Рис. 18.1

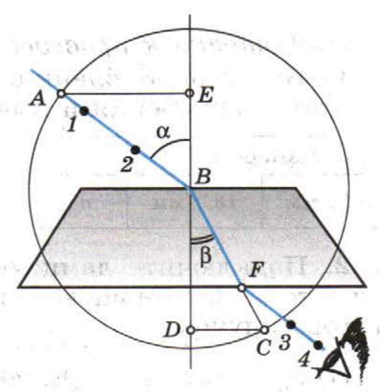


Рис. 18.2

и преломленный лучи (рис. 18.2). Через точку B границы раздела сред воздух — стекло проводят перпендикуляр к границе, отмечают углы падения α и преломления β. Далее с помощью циркуля проводят окружность с центром в точке B и строят прямоугольные треугольники ABE и CBD.

Так как $\sin\alpha = \dfrac{AE}{AB}$, $\sin\beta = \dfrac{CD}{BC}$ и $AB = BC$, то формула для определения показателя преломления стекла примет вид

$$n_{\text{пр}} = \frac{AE}{DC}. \qquad (18.1)$$

Длины отрезков AE и DC измеряют по миллиметровой бумаге или с помощью линейки. При этом в обоих случаях инструментальную погрешность можно считать равной 1 мм. Погрешность отсчета надо взять также равной 1 мм для учета неточности в расположении линейки относительно края светового пучка.

Максимальную относительную погрешность ε измерения показателя преломления определяют по формуле

$$\varepsilon = \frac{\Delta AE}{AE} + \frac{\Delta DC}{DC}.$$

Максимальная абсолютная погрешность определяется по формуле

$$\Delta n = n_{\text{пр}}\varepsilon.$$

(Здесь $n_{\text{пр}}$ — приближенное значение показателя преломления, определяемое по формуле (18.1).)

Окончательный результат измерения показателя преломления записывается так:

$$n = n_{\text{пр}} \pm \Delta n.$$

Подготовка к проведению работы

1. Подготовьте бланк отчета с таблицей для записи результатов измерений и вычислений.

Измерено		Вычислено				
AE, мм	DC, мм	$n_{пр}$	ΔAE, мм	ΔDC, мм	ε, %	Δn

2. Подключите лампочку через выключатель к источнику тока. С помощью экрана с щелью получите тонкий световой пучок.

Проведение эксперимента, обработка результатов измерений

1. Измерьте показатель преломления стекла относительно воздуха при каком-нибудь угле падения. Результат измерения запишите с учетом вычисленных погрешностей.

2. Повторите то же при другом угле падения.

3. Сравните результаты, полученные по формулам

$$n_{1пр} - \Delta n_1 < n_1 < n_{1пр} + \Delta n_1,$$
$$n_{2пр} - n_2 < n_2 < n_{2пр} + \Delta n_2.$$

4. Сделайте вывод о зависимости (или независимости) показателя преломления от угла падения. (Метод сравнения результатов измерений изложен во введении к лабораторным работам в учебнике физики для X класса.)

Контрольный вопрос

Чтобы определить показатель преломления стекла, достаточно измерить транспортиром углы α и β и вычислить отношение их синусов. Какой из методов определения показателя преломления предпочтительнее: этот или использованный в работе?

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СИЛЫ И ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ СОБИРАЮЩЕЙ ЛИНЗЫ

Оборудование: линейка, два прямоугольных треугольника, длиннофокусная собирающая линза, лампочка на подставке с колпачком, источник тока, выключатель, соединительные провода, экран, направляющая рейка.

Подготовка к проведению работы

Простейший способ измерения оптической силы и фокусного расстояния линзы основан на использовании формулы линзы

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = D \text{ или } \frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}. \quad (18.2)$$

В качестве предмета используется светящаяся рассеянным светом буква в колпачке осветителя. Действительное изображение этой буквы получают на экране.

Проведение эксперимента

1. Соберите электрическую цепь, подключив лампочку к источнику тока через выключатель.

2. Поставьте лампочку на край стола, а экран — у другого края. Между ними поместите линзу, включите лампочку и передвигайте линзу вдоль рейки, пока на экране не будет получено резкое изображение светящейся буквы.

Для уменьшения погрешности измерений, связанной с настройкой на резкость, целесообразно получить уменьшенное (и, следовательно, более яркое) изображение.

3. Измерьте расстояния d и f, обратив внимание на необходимость тщательного отсчета расстояний.

При неизменном d повторите опыт несколько раз, каждый раз заново получая резкое изображение. Вычислите $f_{ср}$, $D_{ср}$, $F_{ср}$. Результаты измерений расстояний (в миллиметрах) занесите в таблицу.

Номер опыта	f, 10^{-3} м	$f_{ср}$, 10^{-3} м	d, 10^{-3} м	$D_{ср}$, дптр	$F_{ср}$, м
1					
2					
3					

4. Абсолютную погрешность ΔD измерения оптической силы линзы можно вычислить по формуле $\Delta D = \frac{\Delta_1}{d^2} + \frac{\Delta_2}{f^2}$, где Δ_1 и Δ_2 — абсолютные погрешности в измерении d и f.

При определении Δ_1 и Δ_2 следует иметь в виду, что измерение расстояний d и f не может быть проведено с погрешностью, меньшей половины толщины линзы h.

Так как опыты проводятся при неизменном d, то $\Delta_1 = \frac{h}{2}$. Погрешность измерения f будет больше из-за неточности настройки на резкость примерно еще на $\frac{h}{2}$. Поэтому $\Delta_2 = \frac{h}{2} + \frac{h}{2} = h$.

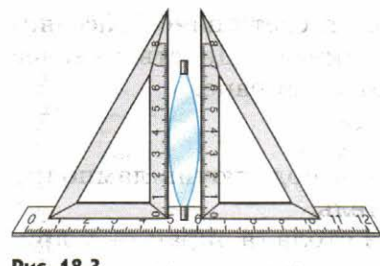


Рис. 18.3

5. Измерьте толщину линзы h (рис. 18.3) и вычислите ΔD по формуле

$$\Delta D = \frac{h}{2d^2} + \frac{h}{f^2}.$$

6. Запишите результат в форме

$$D_{ср} - \Delta D \leqslant D \leqslant D_{ср} + \Delta D.$$

6. ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ

Оборудование, необходимые измерения. В работе для определения длины световой волны используется дифракционная решетка с периодом $\frac{1}{100}$ мм или $\frac{1}{50}$ мм (период указан на решетке). Она является основной частью измерительной установки, показанной на рисунке 18.4. Решетка *1* устанавливается в держателе *2*, который прикреплен к концу линейки *3*. На линейке же располагается черный экран *4* с узкой вертикальной щелью *5* посредине. Экран может перемещаться вдоль линейки, что позволяет изменять расстояние между ним и дифракционной решеткой. На экране и линейке имеются миллиметровые шкалы. Вся установка крепится на штативе *6*.

Если смотреть сквозь решетку и прорезь на источник света (лампу накаливания или свечу), то на черном фоне экрана можно наблюдать по обе стороны от щели дифракционные спектры 1-го, 2-го и т. д. порядков.

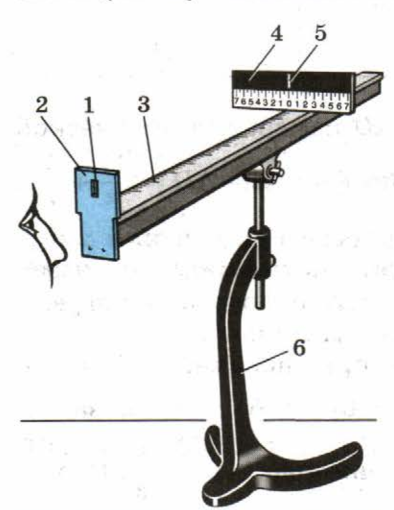


Рис. 18.4

Длина волны λ определяется по формуле

$$\lambda = \frac{d \sin \varphi}{k},$$

где d — период решетки; k — порядок спектра; φ — угол, под которым наблюдается максимум света соответствующего цвета.

Поскольку углы, под которыми наблюдаются максимумы 1-го и 2-го порядков, не превышают 5°, можно вместо сину-

сов углов использовать их тангенсы. Из рисунка 18.5 видно, что

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{b}{a}.$$

Расстояние a отсчитывают по линейке от решетки до экрана, расстояние b — по шкале экрана от щели до выбранной линии спектра.

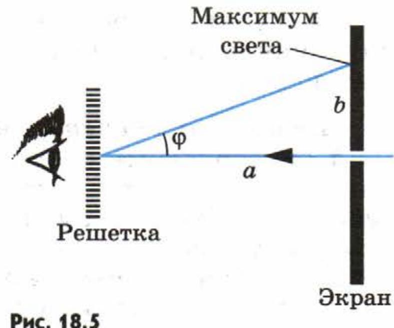


Рис. 18.5

Окончательная формула для определения длины волны имеет вид

$$\lambda = \frac{db}{ka}.$$

В этой работе погрешность измерений длин волн не оценивается из-за некоторой неопределенности выбора середины части спектра данного цвета.

Подготовка к проведению работы

1. Подготовьте бланк отчета с таблицей для записи результатов измерений и вычислений.

2. Соберите измерительную установку, установите экран на расстоянии 50 см от решетки.

3. Глядя сквозь дифракционную решетку и щель в экране на источник света и перемещая решетку в держателе, установите ее так, чтобы дифракционные спектры располагались параллельно шкале экрана.

Проведение эксперимента, обработка результатов измерений

1. Вычислите длину волны красного цвета в спектре 1-го порядка справа и слева от щели в экране, определите среднее значение результатов измерения.

2. Проделайте то же для фиолетового цвета.

3. Сравните полученные результаты с длинами волн красного и фиолетового цвета на рис. V, *1* цветной вклейки.

Контрольный вопрос

Чем отличается дифракционный спектр от дисперсионного?

7. НАБЛЮДЕНИЕ СПЛОШНОГО И ЛИНЕЙЧАТОГО СПЕКТРОВ

Оборудование: проекционный аппарат, спектральные трубки с водородом, неоном или гелием, высоковольтный индуктор, источник питания, штатив, соединительные

провода (эти приборы являются общими для всего класса), стеклянная пластина со скошенными гранями (выдается каждому).

Проведение эксперимента

1. Расположите пластину горизонтально перед глазом. Сквозь грани, составляющие угол 45°, наблюдайте светлую вертикальную полоску на экране — изображение раздвижной щели проекционного аппарата.

2. Выделите основные цвета полученного сплошного спектра и запишите их в наблюдаемой последовательности.

3. Повторите опыт, рассматривая полоску через грани, образующие угол 60°. Запишите различия в виде спектров.

4. Наблюдайте линейчатые спектры водорода, гелия или неона, рассматривая светящиеся спектральные трубки сквозь грани стеклянной пластины. Запишите наиболее яркие линии спектров.

ОТВЕТЫ К УПРАЖНЕНИЯМ

Упражнение 1. 3. $1,2 \cdot 10^{-2}$ Дж. **4.** ≈0,57 мм; $\approx 3,6 \cdot 10^{-9}$ с.

Упражнение 2. 4. 0,2 А. **5.** 0,15 В. **6.** 0,1 Гн; 0,75 Дж. **7.** ≈0; 1,2 Дж.

Упражнение 3. 1. ≈15,8 Н/м. **2.** ≈20 с. **3.** 0,4 м. **4.** ≈9 рад/с; $3,2 \cdot 10^{-3}$ Дж. **5.** 19,2 км/ч.

Упражнение 4. 1. $5 \cdot 10^{-3}$ Дж. **2.** $\approx 1,26 \cdot 10^{-6}$ с. **3.** От ≈16 до 10 мГн. **4.** ≈0,63 В. **5.** ≈0,28 А.

Упражнение 5. 1. Прослойки между пластинами должны быть перпендикулярны оси вала. **3.** Можно, например, намотать поверх одной из обмоток дополнительную обмотку с известным числом витков и измерить напряжение на ее концах при подаче на другую обмотку известного напряжения. **4.** Трансформатор может сгореть, так как сопротивление обмотки постоянному току гораздо меньше, чем переменному.

Упражнение 6. 1. ≈5000 м/с. **2.** π. **3.** Увеличится в ≈4,2 раза.

Упражнение 7. 1. От $\lambda_1 \approx 92$ м до $\lambda_2 \approx 565$ м. **2.** Так как антенна горизонтальна, вектор напряженности электрического поля также расположен горизонтально. Следовательно, вектор магнитной индукции вертикален. **3.** Да, т. к. на Луне нет ионосферы, которая отражает радиоволны и позволяет передавать сигналы на большие расстояния.

Упражнение 8. 1. Явление обусловлено прямолинейностью распространения света сквозь малое отверстие в ставне. **2.** Размеры полутени зависят от расстояния от непрозрачной преграды до экрана. При малом расстоянии (ноги) полутень мала, а при большом (голова) велика. Если бы фонарь был точечным источником, тени от головы и ног были бы одинаково резкими. **3.** $k \cdot 528$ об/с (где $k = 1, 2, 3, \ldots$). **4.** $x = 2l \sin \alpha = 10$ см. **6.** $H/2$. Нижний край зеркала должен отстоять от пола на расстоянии, равном половине расстояния глаз от пола. Верхний край зеркала должен находиться на высоте, меньшей роста человека на величину, равную половине расстояния от глаз до макушки. **7.** ≈0,55; ≈1,24. **8.** $n = 2$.

Упражнение 9. 1. Изображение будет таким же четким, но его освещенность уменьшится. **3.** Показатель преломления воды очень близок к показателю преломления вещества глаза;

поэтому лучи, попадающие в глаз, почти не преломляются, и, следовательно, глаз становится очень дальнозорким. **7.** На расстоянии $F/2$.

Упражнение 10. 1. Светлое пятно. **2.** $\approx 5{,}2 \cdot 10^{-7}$ м.

Упражнение 11. 1. С точки зрения наблюдателя на земле удар молнии в точке B (позади поезда) произошел раньше. **2.** $\approx 10^6$ В. **3.** Не может.

Упражнение 12. 2. $\approx 1{,}5$. **3.** $\approx 4 \cdot 10^{-19}$ Дж. **4.** $\approx 2{,}5 \cdot 10^{-7}$ м.

Упражнение 13. 1. $\approx 2 \cdot 10^6$ м/с; $\approx 10^{23}$ м/с^2. **2.** $\approx 4{,}9 \cdot 10^{-7}$ м.

Упражнение 14. 1. Восемь α-превращений, шесть β-превращений. **2.** Через 3200 лет. **3.** В $\sqrt{2}$ раз. **5.** $\approx 2{,}2$ МэВ. **7.** ≈ 755 МэВ.

Упражнение 15. 1. $6 \cdot 10^{23}$ кг. **2.** 6690 км. **3.** $e = 0{,}017$. **4.** За 1,7 сут.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ (Продолжение)

КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

ОПТИКА

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

АСТРОНОМИЯ

Учебное издание

Серия «Классический курс»

Мякишев Геннадий Яковлевич
Буховцев Борис Борисович
Чаругин Виктор Максимович

ФИЗИКА

11 класс

Учебник для общеобразовательных организаций с приложением на электронном носителе

Базовый и профильный уровни

ЦЕНТР ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Руководитель Центра **В. И. Егудин**. Редактор **Г. Н. Федина**. Младший редактор **Т. И. Данилова**. Художник **В. С. Давыдов**. Художественный редактор **Т. В. Глушкова**. Технический редактор и верстальщик **А. Г. Хуторовская**. Корректоры **Л. С. Александрова, В. М. Гончар**

Налоговая льгота — Общероссийский классификатор продукции ОК 005-93—953000. Изд. лиц. Серия ИД № 05824 от 12.09.01. Подписано в печать 01.08.13. Формат $60 \times 90^1/_{16}$. Бумага офсетная. Гарнитура SchoolBook. Печать офсетная. Уч.-изд. л. 22,53 + форз. 0,46 + вкл. 0,53. Тираж 40 000 экз. Заказ № 35678 (К-Гз).

Открытое акционерное общество «Издательство «Просвещение».
127521, Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41.

Отпечатано в филиале «Смоленский полиграфический комбинат»
ОАО «Издательство «Высшая школа». 214020, Смоленск, ул. Смольянинова, 1.
Тел.: +7 (4812) 31-11-96. Факс: +7 (4812) 31-31-70
E-mail: spk@smolpk.ru http://www.smolpk.ru